

---

# **Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen durch eine Life Cycle Unit**

---

Von Dipl.-Ing., Dipl.-Kfm. (FH)  
Waldemar Grudzien  
aus Berlin

von der Fakultät V, Verkehrs- und Maschinensysteme,  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -  
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. F.-L. Krause

Gutachter: Prof. Dr. G. Seliger

Gutachter: Prof. Dr. D. Filbert

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 27. Februar 2002

Berlin 2002

D 83



**Inhaltsverzeichnis**

0	Verwendete Kurzzeichen .....	IV
1	Einleitung und Zielsetzung .....	1
2	Stand der Technik .....	5
2.1	Abnutzung .....	5
2.1.1	Physische Veränderungen .....	6
2.1.1.1	Alterung .....	6
2.1.1.2	Bruch .....	7
2.1.1.3	Ermüdung .....	8
2.1.1.4	Korrosion .....	9
2.1.1.5	Kriechen .....	10
2.1.1.6	Verformung .....	11
2.1.1.7	Verschiebung/Verlust .....	12
2.1.1.8	Verschleiß .....	13
2.1.1.9	Verschmutzung .....	14
2.1.1.10	Erfassung .....	15
2.1.2	Veränderte Anforderungen .....	17
2.2	Anpassung .....	18
2.3	Bereitstellung von Abnutzungsinformationen .....	19
2.3.1	Zuverlässigkeitsanalyse .....	19
2.3.2	Empirische Methoden .....	27
2.3.2.1	Serienerprobung .....	28
2.3.2.2	Marktforschung .....	29
2.3.2.3	Felddatenerfassung und -verarbeitung .....	29
2.4	Sensoren .....	30
2.4.1	Biologische Sensoren .....	32
2.4.2	Chemische Sensoren .....	35
2.4.3	Physikalische Sensoren .....	36
2.4.3.1	Kapazitive Sensoren .....	36
2.4.3.2	Magnetische Sensoren .....	37
2.4.3.3	Mechanische Sensoren .....	38
2.4.3.4	Piezoelektrische Sensoren .....	38
2.4.3.5	Resistive Sensoren .....	39
2.4.3.6	Strahlungssensoren .....	39
2.5	Komponenten zur Verarbeitung, Speicherung und Übertragung .....	40
2.5.1	Prozessor und Mikrocontroller .....	41
2.5.2	Speicher .....	44
2.5.2.1	Markierungen .....	44

2.5.2.2 Halbleiterspeicher .....	45
2.5.3 Interface .....	47
2.6 Aktoren .....	48
2.6.1 Chemische Aktoren .....	50
2.6.1.1 Auflösungs- und Quellungsaktoren .....	50
2.6.1.2 Elektrochemische Aktoren .....	51
2.6.2 Physikalische Aktoren .....	51
2.6.2.1 Dehnstoffaktoren .....	51
2.6.2.2 Elektromagnetische Aktoren .....	51
2.6.2.3 Elektrorheologische Aktoren .....	52
2.6.2.4 Elektronische Aktoren .....	52
2.6.2.5 Elektrostatische Aktoren .....	52
2.6.2.6 Fluidische Aktoren .....	52
2.6.2.7 Magnetorheologe Aktoren .....	53
2.6.2.8 Magnetostatische Aktoren .....	53
2.6.2.9 Magnetostriktive Aktoren .....	53
2.6.2.10 Memoryeffektaktoren .....	54
2.6.2.11 Piezoelektrische Aktoren .....	54
2.6.2.12 Pneumatische Aktoren .....	54
2.6.2.13 Thermobimetallaktoren .....	55
2.6.2.14 Thermoelektrische Aktoren .....	55
2.7 Anwendungen .....	55
2.7.1 Passive Produktdatenbereitstellung .....	57
2.7.2 Aktive Produktdatenbereitstellung .....	60
2.7.3 Aktive Produktdatenumsetzung .....	65
3 Handlungsbedarf .....	67
4 Systementwicklung .....	69
4.1 Funktionsstruktur .....	69
4.2 Informationen für Anpassung .....	70
4.3 Systemstruktur .....	73
4.4 Kombinationsmöglichkeiten der Untersysteme .....	75
4.5 Teilsysteme .....	82
4.5.1 Energiefluss .....	82
4.5.2 Informationsfluss .....	84
4.5.3 Stofffluss .....	86
4.6 Kalkulation .....	86
4.6.1 Kosten .....	87
4.6.1.1 Sensorik .....	87
4.6.1.2 Markierung .....	90

4.6.1.3 LCB .....	90
4.6.1.4 Aktorik .....	92
4.6.2 LCU-Dienste .....	93
4.6.2.1 Anpassungsdaten .....	93
4.6.2.2 Qualitätssicherung .....	93
4.6.2.3 Beweislastsicherung .....	94
4.6.2.4 Added Value.....	95
4.6.3 Monetär nicht bewertbare Leistungen .....	97
4.6.4 Waschmaschine.....	97
4.6.4.1 Kosten .....	97
4.6.4.2 Leistungen.....	99
4.6.4.3 Monetär nicht bewertbare Leistungen .....	101
4.6.5 Gegenüberstellung und Bewertung der Ergebnisse.....	102
4.7 Auslegung der LCU.....	105
4.8 Geschäftsfeldbetrachtung .....	111
4.8.1 Interessengruppen an LCU-Diensten.....	112
4.8.1.1 Produktrecycler .....	113
4.8.1.2 Hersteller.....	114
4.8.1.3 Eigentümer.....	114
4.8.1.4 Nutzer.....	115
4.8.2 Geschäftsfelder des Beispielprodukts Waschmaschine.....	116
5 Realisierung.....	120
5.1 Anpassungssystemsoftware .....	121
5.2 Farb- und Formerkennung von Lackfarbenmarkierungen .....	122
5.2.1 Formerkennung.....	123
5.2.2 Farbe .....	124
5.2.3 Konturen .....	125
5.3 Lese- und Schreibsystem für Barcodes und Transponder .....	125
5.4 Waschmaschine.....	128
5.5 Verbindungselemente mit integrierten Aktoren .....	131
5.6 Internet-Kaffeemaschine .....	137
5.7 Internet-Automobil.....	143
5.8 Verbindungselemente mit integrierten Sensoren .....	144
5.9 Ventilator.....	145
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	147
7 Schrifttum .....	149
8 Anhang .....	158

## 0 Verwendete Kurzzeichen

Formelzeichen sind an der entsprechenden Position im Text erklärt.

### Abkürzungen

μC	Mikrocontroller
ABS	Antiblockiersystem
ADU	Analog Digital Umsetzer
ALU	Arithmetisch-Logische-Einheit
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
CAN	Controller Area Network
CCD	Charged Coupled Device
CHEMFET	Chemically Sensitive Field Effect Transistor
CuZnAl	Kupfer-Zink-Aluminium Legierung
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DLL	Dynamic Link Library
DMS	Dehnungsmessstreifen
DOE	Design of Experiments
DRAM	Dynamic Random Access Memory
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EPROM	Erasable Programmable Read Only Memory
ESP	elektronisches Stabilitätsprogramm
FET	Feldeffekttransistor
FMEA	Fehler- Möglichkeits- und Einfluss-Analyse
FPGA	Field Programmable Gate Array
FRAM	Ferroelectric Random Access Memory
FTA	Failure Tree Analysis (Fehlerbaumanalyse)
GASFET	Gas Sensitive FET
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HSI	Hue Saturation Intensity
IC	Integrated Circuit
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IrDA	Infrared Data Association
ISFET	Ion Sensitive FET

IZM	Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (Fraunhofer Gesellschaft)
LCB	Life Cycle Board
LCU	Life Cycle Unit
MOS	Metal Oxid Semiconductor
MOS-FET	Metalloxid-Feldeffekttransistor
MRAM	Magnetic Random Access Memory
NiTi	Nickel-Titan Legierung
NTC	Negative Temperature Coefficient
NVDRAM	Non Versatile DRAM
NVSRAM	Non Versatile SRAM
PC	Personal Computer
PDA	Personal Digital Assistant
PROM	Programmable Read Only Memory
PTC	Positive Temperature Coefficient
QFD	Quality Function Deployment
QS	Qualitätssicherung
RGB	Rot-Grün-Blau Farbmodell
ROM	Read Only Memory
SMA	Smart Material Alloy
SMD	Surface-mounted device
SMP	Smart Material Polymers
SMS	Short Message Service
SPC	Statistical Process Control
SPR	Surface Plasmon Resonance
SQUID	Superconducting Quantum Interference Devices
SRAM	Static Random Access Memory
S/W	schwarz-weiß
VBA	Visual Basic for Applications





## 1 Einleitung und Zielsetzung

Das globale Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum sowie wachsende Bedürfnisse der Menschen steigern den Bedarf an Produktion, Nutzung und Entsorgung von Gütern. Allein in Deutschland fallen pro Jahr rund 1 Mio. Tonnen gebrauchter elektrischer und elektronischer privat genutzter Altgeräte an. Davon entfallen deutlich mehr als die Hälfte auf Geräte der Weißen Ware, rund ein Fünftel auf Geräte der Braunen Ware und knapp ein Fünftel auf privat genutzte Büro-, Informations- und Kommunikationsgeräte.<sup>1</sup> Allein ausrangierte Computer, Drucker, Telefax- und Telefongeräte türmen sich jährlich zu einem Berg von 260.000t Elektroschrott [LÜT-98]. Die Auswirkungen sind ein steigender Ressourcenverbrauch und erhöhter Schadstoffeintrag mit der Folge der Überschreitung ökologischer Grenzen der Umwelt. Nur durch eine deutliche Senkung des Pro-Kopf-Verbrauchs an Energie und Ressourcen können diese Bedarfe ökologisch verträglich gedeckt werden. Hierzu muss die Nutzenproduktivität von Ressourcen erhöht werden [SEL-00].

Die Verwendung von Produkten, Komponenten und Bauteilen über mehrere Nutzungsphasen hinweg erhöht die Nutzenproduktivität und verringert den Ressourcenverbrauch [MÜL-01]. Abnutzung beendet Nutzungsphasen, Anpassung ermöglicht durch Entgegenwirken der Abnutzung weitere Nutzungsphasen. Werden Produkte sowie deren Komponenten und Bauteile im Laufe ihres Lebenszyklus an unterschiedliche Nutzungsphasen angepasst, so kann eine zu frühe Entsorgung verhindert werden. Wesentlich für eine effektive und effiziente Anpassung sind zum richtigen Zeitpunkt und am richtigen Ort verfügbare Produkt- und Prozessinformationen, die neben der Abnutzung des Produktes auch Handlungsanweisungen für passende Anpassungsoperationen erteilen. Werden alle für die Anpassung relevanten Informationen – Anpassungsinformationen – produktbegleitend bereitgestellt und intelligent umgesetzt, kann durch Anpassung nach Abnutzung für jeweils neue Nutzungsphasen die Lebensdauer von Produkten verlängert werden.

Heute wird Abnutzung mit Hilfe des Ausfallverhaltens von Bauteilen, Komponenten und Produkten bestimmt. Das Ausfallverhalten wird durch die Zuverlässigkeit beschrieben. Informationen über das Ausfallverhalten stammen aus der Zuverlässigkeitsanalyse, Serienerprobung, Marktforschung sowie Felddatenerfassung und -verarbeitung. Es sind jedoch nur wenige Zuverlässigkeitsmodelle für Komponenten vorhanden, die oftmals eine eingeschränkte Aussagesicherheit aufgrund ungenügender Informationen über den Produktlebenslauf und unbekannter Zusammenhänge zwischen Beanspruchung und Ausfallverhalten aufweisen [BER-99].

---

<sup>1</sup> ZVEI (<http://www.zvei.org/umwelt/>) am 23.08.2001

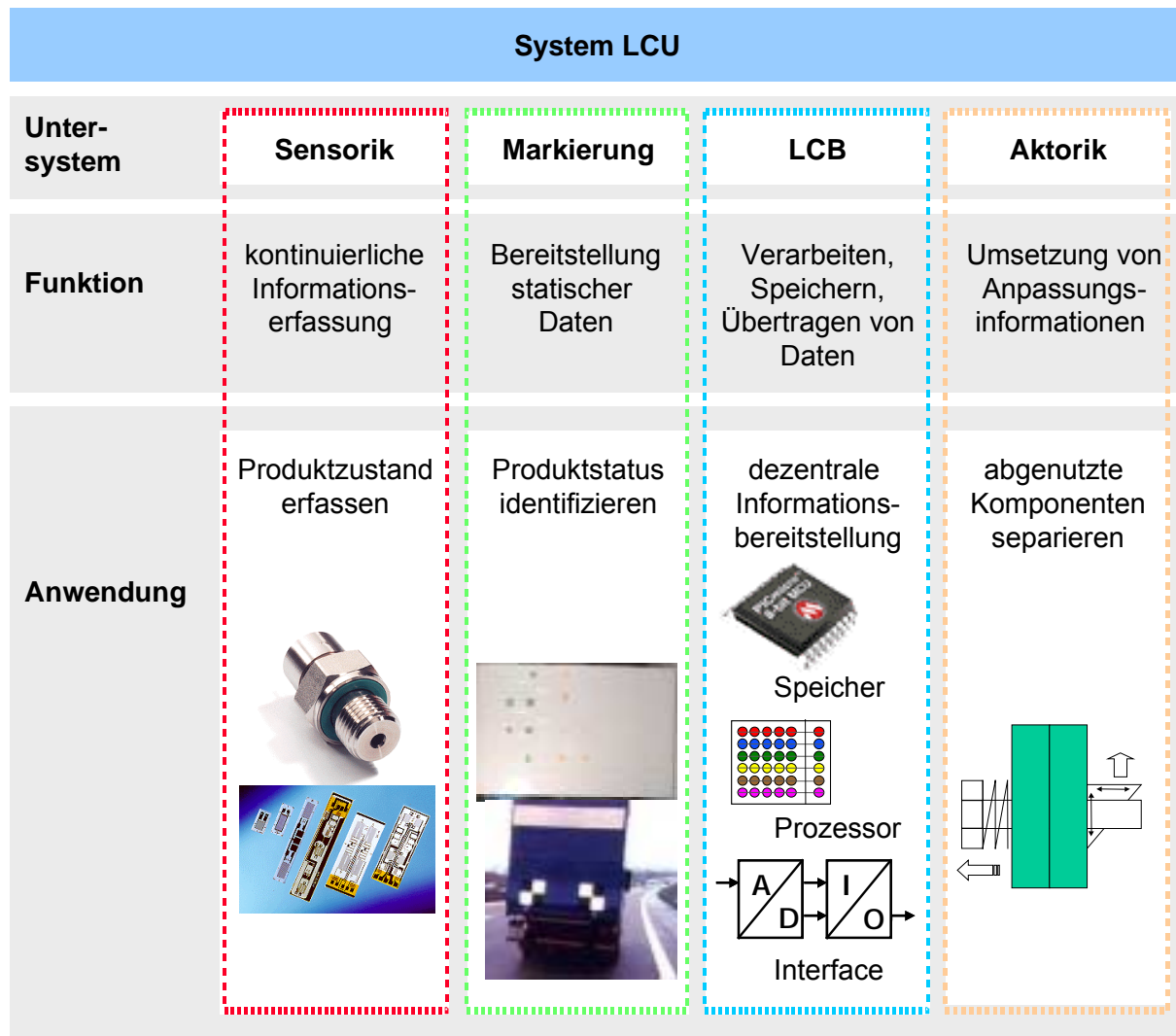
Ohne hinreichend genaue Bestimmung der Abnutzung kann nicht effektiv und effizient angepasst werden. Ein Ansatz zur Verbesserung der Bestimmung der Abnutzung ist es, kontinuierlich Abnutzungsinformationen von Produkten und Komponenten zur Nutzungszeit zu erfassen und mit Zuverlässigkeitsmodellen zu koppeln. Vorhandene Systeme zur Bereitstellung von Produktdaten stellen größtenteils Spezialentwicklungen für einzelne Anwendungen dar. Es fehlt ein flexibel einsetzbares, modular und skalar konzipiertes System zur Unterstützung der Anpassung.

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines produktbegleitenden Systems zur Erfassung von Abnutzung und Unterstützung von Anpassung sowie dessen Realisierung in Pilotanwendungen. Das System stellt durch Erfassung der Abnutzung, Verarbeitung, Speicherung und Übertragung der Abnutzung sowie weiterer Produktinformationen wie z.B. dem Demontageplan Anpassungsinformationen bereit, um durch deren Umsetzung die Anpassung von Produkten, Komponenten und Bauteilen zu erleichtern. Da hierzu Abnutzungsinformationen während des ganzen Lebenszyklus der sich abnutzenden Objekte bereitgestellt werden müssen, wird das System als Life Cycle Unit (LCU) bezeichnet. Die LCU erfasst die Abnutzung, verarbeitet, speichert und überträgt Anpassungsinformationen und setzt sie mit Aktoren um.

Diese Funktionalität erfordert verschiedene Untersysteme zu ihrer Umsetzung: So kann über die Erfassung des Produktzustands durch Sensoren die Abnutzung bestimmt werden. Statische Informationen können mit Markierungen wie Lackfarben und Barcodes bereitgestellt werden. Für die Funktionen Verarbeiten, Speichern und Übertragung von Informationen eignen sich sehr gut mikroelektronische Komponenten wie Prozessor, Speicher und Interface. Diese drei Komponenten können einzeln oder in einem Gehäuse als Mikrocontroller vereint verwendet werden. Die Umsetzung von Anpassungsinformationen kann durch im Produkt integrierte Aktoren durchgeführt werden. Zur Erfüllung der definierten Teilfunktionen besteht die LCU aus den vier Untersystemen

- Sensorik,
- Markierung,
- Life Cycle Board (LCB) und
- Aktorik.

In Bild 1 ist die Struktur der LCU mit Funktion und Anwendung der vier Untersysteme dargestellt.



**Bild 1:** Struktur des Systems Life Cycle Unit

Gelingt es, Funktionalität nach Art, Ort, Zeit, Qualität und Menge zu angemessenem Preis bereitzustellen, kann der Kauf des Nutzens für den Kunden attraktiver werden als der Kauf des vergleichbaren Produkts [SEL-00]. Betreiberkonzepte, Flottenmanagement, Optimierung der „total cost of ownership“, Vermietung, Leasing und Lizenzen sowie Serviceangebote in der Instandhaltung können als Zeichen der Ausnutzung neuer Profitmöglichkeiten einer kreislaforientierten Wirtschaft gewertet werden.

Eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft kann nur erreicht werden, wenn neben den ökologischen auch die ökonomischen Chancen in Betracht gezogen werden [ZUS-94]. Als Werkzeug der Anpassung muss deshalb nicht nur die technische Machbarkeit, sondern auch die Wirtschaftlichkeit der LCU gewährleistet sein. Hierzu werden Methoden zur Kalkulation sowie Erschließung von Anwendungsfeldern der LCU entwickelt und am Beispielprodukt Waschmaschine evaluiert. Kapitel 2 gibt eine Übersicht über den Stand der Technik der Bereitstellung und Umsetzung von Infor-

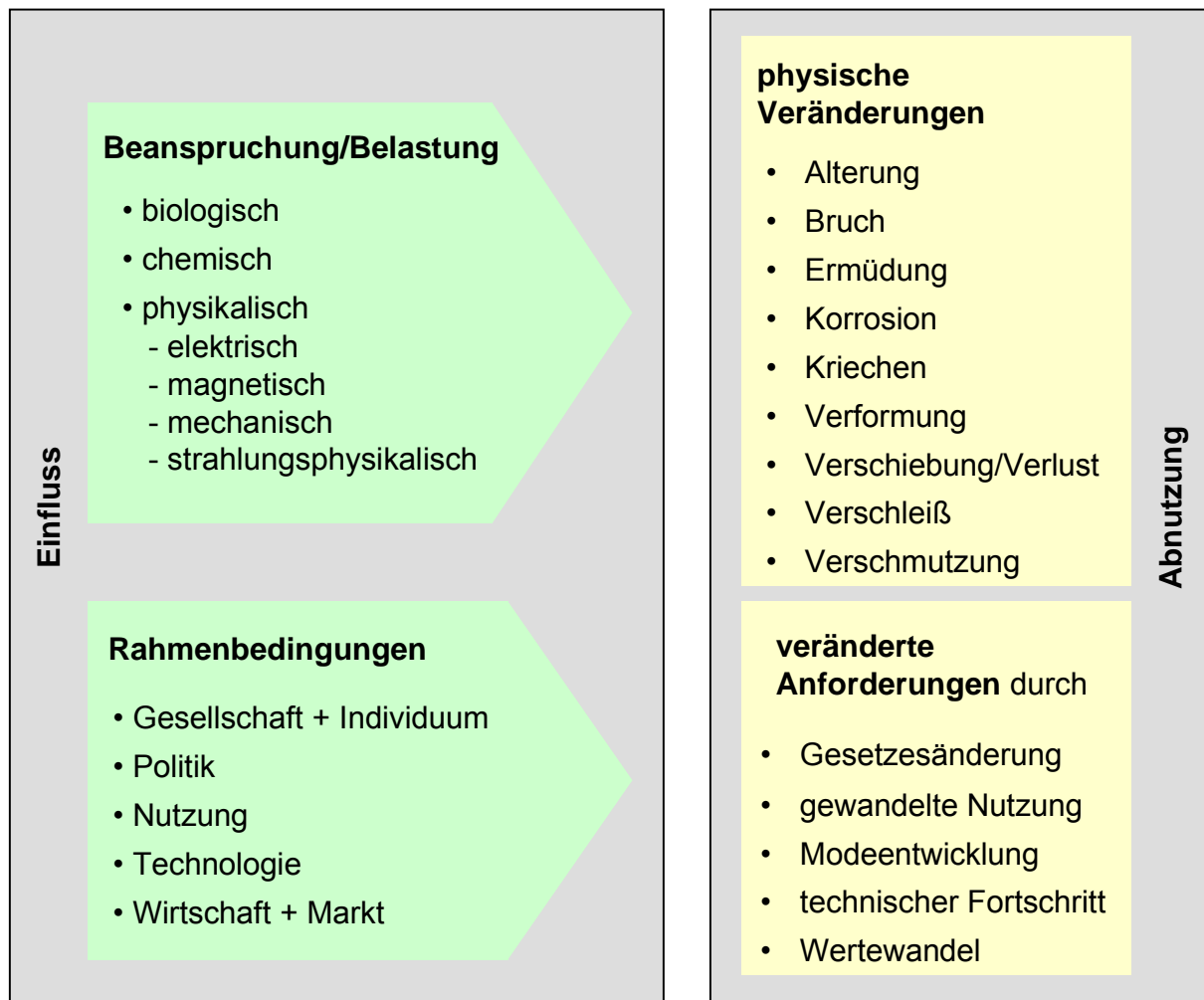
mationen zum Zweck der Anpassung von Produkten. Auf Basis von Kapitel 2 wird ein Handlungsbedarf in Kapitel 3 abgeleitet, der die LCU als System zur Beseitigung der Defizite aus dem Stand der Technik benennt, deren Systementwicklung in Kapitel 4 beschrieben wird. In Kapitel 5 werden die realisierten Pilotanwendungen der LCU dargestellt. Im Anhang werden die für diese Arbeit wichtigen physikalischen Messgrößen hinsichtlich Messprinzipien, Ausführungsformen und veränderten Parameter der Sensoren aufgelistet.

## 2 Stand der Technik

Abnutzung vermindert den Nutzenvorrat eines Produktes. Durch Anpassung kann der Nutzenvorrat vergrößert werden. Relevante Informationen über das Produkt und seinen Abnutzungszustand müssen als Daten bereitgestellt werden, um die Anpassung danach zu steuern.

### 2.1 Abnutzung

Abnutzungen werden nach [MÜL-01] in physische Veränderungen und veränderte Anforderungen eingeteilt (Bild 2).



**Bild 2:** Klassifikation der Abnutzung nach [MÜL-01]

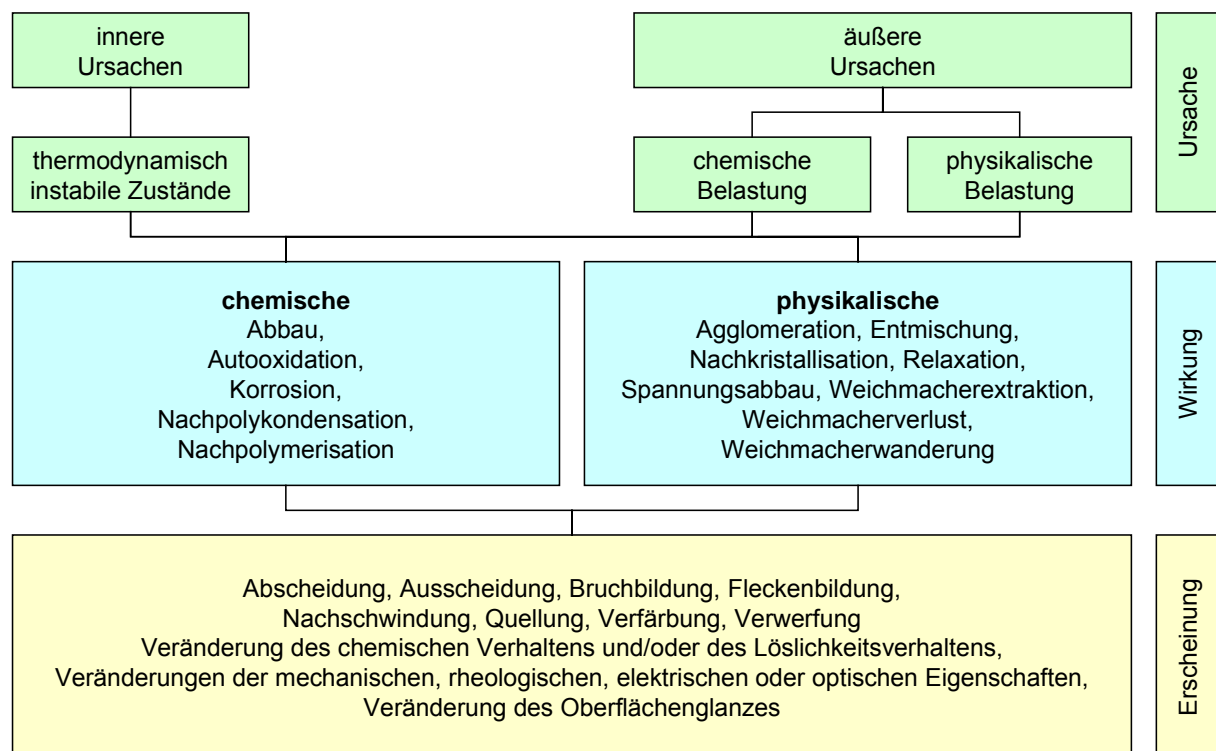
Biologische, chemische oder physikalische auf Produkte wirkende Beanspruchungen werden durch Produkte als unterschiedliche Belastungen wahrgenommen und führen zu physischen Veränderungen wie Verschleiß, Alterung oder Bruch. Veränderte Anforderungen können aus technischem Fortschritt, Gesetzesänderungen, Wertewandel oder Modeentwicklungen resultieren und sind auf umgebungsbedingte Faktoren

wie Politik, Gesellschaft, Wirtschaft und Nutzung zurückzuführen. Physische Veränderungen können messtechnisch erfasst werden.

## 2.1.1 Physische Veränderungen

Die Wirkungen und Erscheinungen von physischen Veränderungen liefern Produktzustandsinformationen, die mit Hilfe von Sensoren als Produktzustandsdaten erfasst werden. Durch Speicherung des zeitpunktorientierten Produktzustands wird der zeitraumorientierte Produktlebenslauf generiert. Die physischen Veränderungen werden in die drei Ebenen Ursache, Wirkung und Erscheinung gegliedert. Die Ursache als Grund und Anlass physischer Veränderungen bilden die auf das Produkt einwirkenden Beanspruchungen. Deren Folge sind Wirkungen, bei denen im Gegensatz zu den Erscheinungen die physische Veränderung noch nicht wahrnehmbar ist. Die physische Veränderung wird durch ihre Erscheinungen sichtbar und erkennbar.

### 2.1.1.1 Alterung



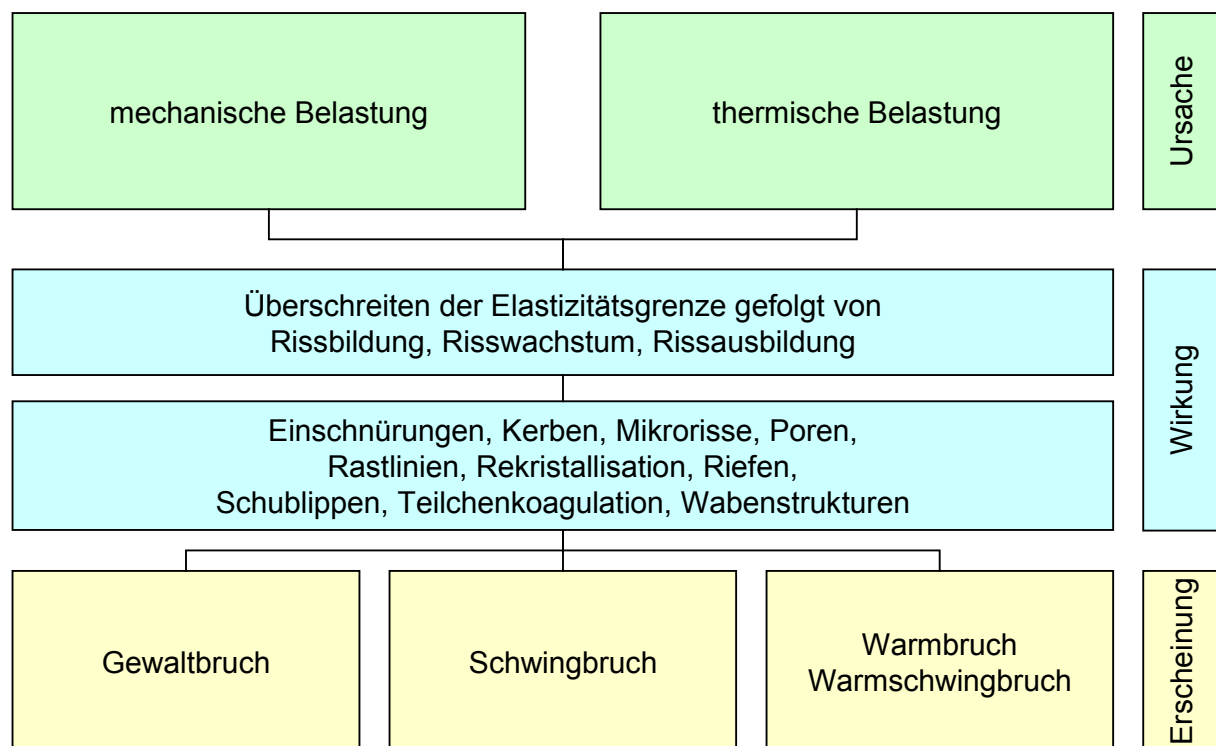
**Bild 3:** Physische Veränderung Alterung [nach DIN 50035 Teil 1 und Teil 2]

Nach DIN 50035 Teil 1 wird unter Alterung die „Gesamtheit aller im Laufe der Zeit in einem Material irreversibel ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge“ verstanden. Bild 3 zeigt mögliche Ursachen der Alterung polymerer Werkstoffe, deren chemische bzw. physikalische Wirkungen und die resultierenden Alterungsercheinungen des Materials. Die chemischen Wirkungen resultieren aus der Veränderung der chemischen Zusammensetzung, der Molekülstruktur und/oder der Molekülgröße des Materials bzw. bei Mehrstoffsystemen mindestens einer der Komponenten

des Materials. Die physikalischen Wirkungen resultieren aus der Veränderung des Gefüges, des molekularen Ordnungszustandes, des Konzentrationsverhältnisses der Komponenten bei Mehrstoffsystemen bzw. der äußeren Form und Struktur oder der messbaren physikalischen Eigenschaften. Als Produktbeispiel seien hier Schweißnähte in bestimmten Rohren von Kernkraftwerken genannt, deren Lebensdauer durch die Alterung auf etwa zehn Jahre begrenzt wird.

Die Ursache ‚thermodynamisch instabile Zustände‘ kann durch Erfassung des Temperatur-Zeit-Profiles erfasst werden. Einige chemische Wirkungen können mit Hilfe von biologischen und chemischen Sensoren erfasst werden. So wird die Nachpolykondensation durch Detektion der freigewordenen niedermolekularen Spaltprodukte Wasser, Alkohole und Salzsäure, die Polymerisation durch Messung der freien Radikale mit einem Sensor für das Redox-Potential und der Abbau durch Messung der Temperatur, der Strahlungsintensität, der Sauerstoff-, Ozon- oder Wasserkonzentration sowie der Art von Mikroorganismen und deren Stoffwechselprodukten erfasst.

### 2.1.1.2 Bruch



**Bild 4:** Physische Veränderung Bruch [nach VDI 3822-2, VDI 3822-4, HÜT-91]

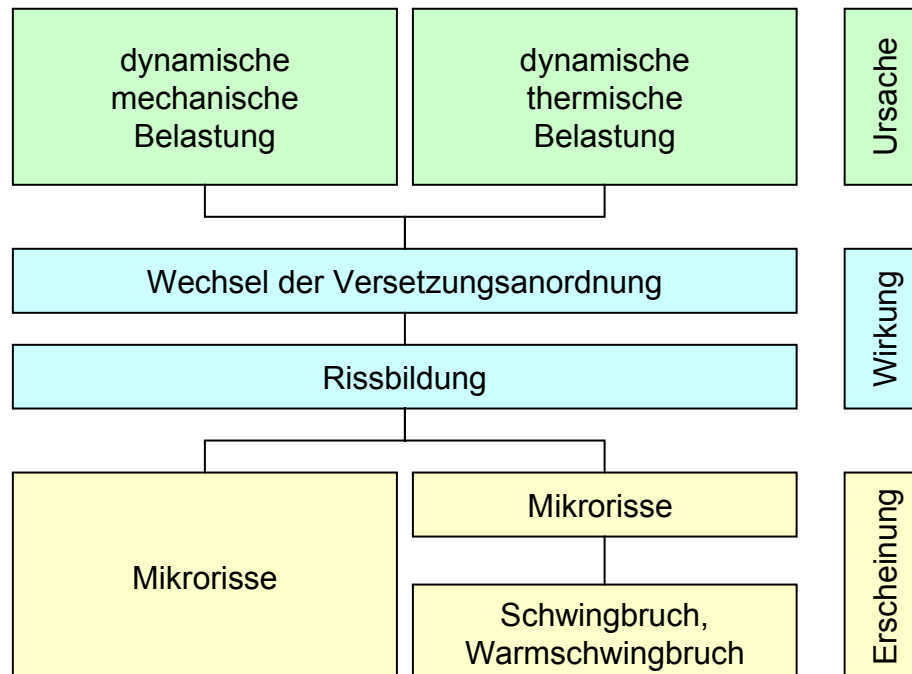
Bruch ist eine makroskopische Werkstofftrennung infolge der Überwindung der Bindungen in Festkörpern durch mechanische Belastung, welche über Dehnung im Werkstoff Spannungen verursachen. Ursachen sind mechanische und/oder thermische Belastungen. Jeder Bruch verläuft in den drei Phasen Rissbildung, Risswachstum und Rissausbildung. Grundsätzlich werden nach [VDI 3822-2] Gewaltbrüche und

Schwingbrüche, nach [VDI 3822-4] Warmbrüche und nach [HÜT-91] zudem noch Warmschwingbrüche unterschieden.

Gewaltbrüche entstehen durch einsinnige mechanische Überlastung unter mäßig rascher bis schlagartiger Belastung nach den zwei Mechanismen verformungsreicher Verformungsbruch und verformungsarmer bzw. verformungsloser Sprödbbruch. Schwingbrüche entstehen durch mechanische Wechselbelastungen und enden im Gewaltbruch. Warmbrüche entstehen durch kombinierte thermische und mechanische Einflüsse. Neben dem Bruch eines integren Festkörpers wird darunter auch der Bruch von durch Klebeverbindungen gefügten Werkstoffen verstanden. Als Produktbeispiel seien hier sicherheitsrelevante Verbindungselemente bei Verkehrsmitteln genannt, deren plötzlicher Ausfall sogar zu Personenschäden führen kann. So wird ein Treibwerk mit dem Flügelkörper durch Bolzen verbunden. Eine Überwachung der Dehnung und Torsion der Bolzen mit Hilfe von DMS böte eine Diagnosemöglichkeit dieser Abnutzung.

Die Ursachen können durch Messung von Dehnung und Temperatur erfasst werden. Die Wirkungen und Erscheinungen von Brüchen können durch Messung der Dehnung erfasst werden. Zusätzlich können Teilchenkoagulation und Rekristallisation über die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit erfasst werden.

### 2.1.1.3 Ermüdung



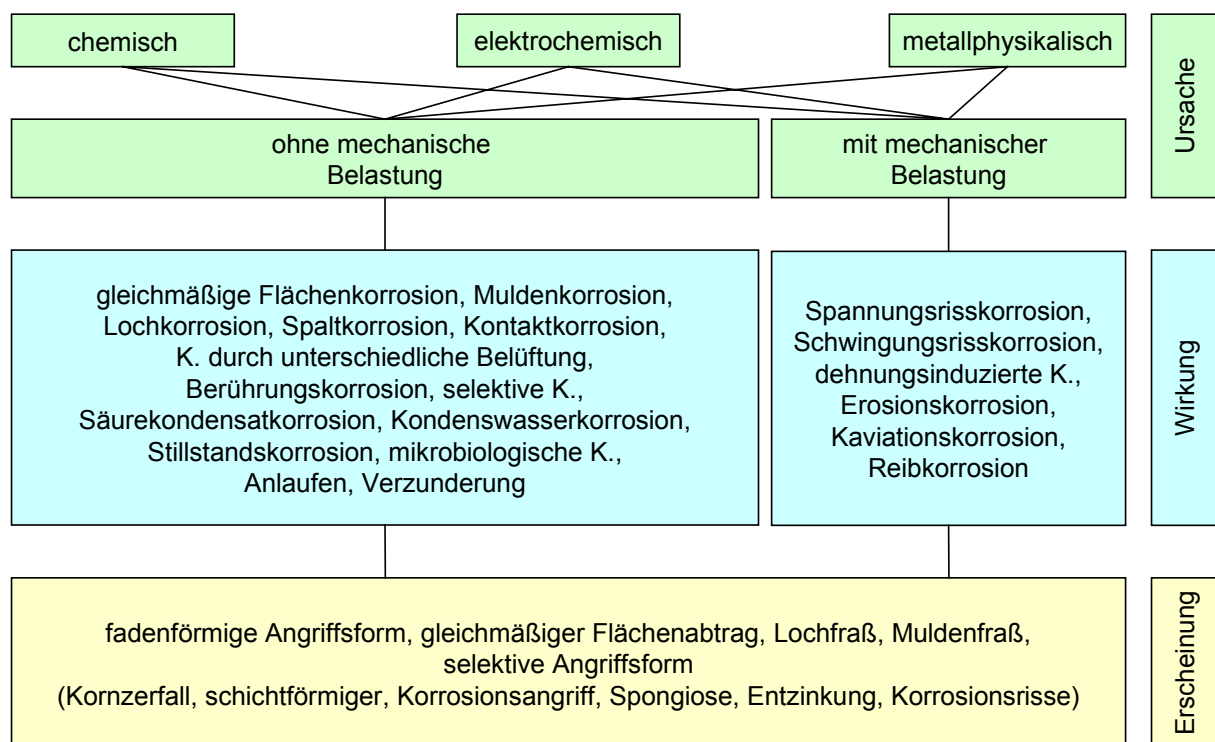
**Bild 5:** Physische Veränderung Ermüdung

Ermüdung ist der Sammelbegriff für die im Werkstoff ablaufenden Prozesse bei mechanischer und/oder thermischer wechselnder bzw. schwingender Belastung [HA1-92]. Im allgemeinen wird die Funktionstüchtigkeit des Bauteils im Verlauf der Belastung beeinträchtigt. Ermüdung tritt auf, wenn die zyklische mechanische oder thermi-



sche Belastung so hoch ist, dass sie im Werkstoff den Wechsel von Versetzungsanordnungen, d.h. eine plastische Verformung bewirkt. Die Folge ist Rissbildung an Rissbildungsstellen und die Rissausweitung, die schließlich zum Schwingbruch nach [VDI 3822-2], bzw. zum Warmschwingbruch nach [HÜT-91] führen können. Die Risse müssen jedoch nicht zwingend zum Bruch des Bauteils führen. Sie bilden auch ohne Bruchbildung eine Abnutzung des Bauteils, indem sie z.B. den Nutzensvorrat verkleinern. Als Produktbeispiel sei hier eine dynamisch belastete Schraube in der Brennkammer einer Gasturbine genannt, die als Verbindungselement zwischen Hitzeschutzplatte und Brennkammerwand dient. Eine Überwachung der Temperatur und Vorspannkraft der Schraube böte eine Diagnosemöglichkeit dieser Abnutzung. Die Ursachen der Ermüdung können durch Messung der dynamischen thermischen und mechanischen Belastung erfasst werden. Die Erscheinungen Mikroriss und Bruch können durch Messung der Dehnung erfasst werden.

#### 2.1.1.4 Korrosion



Legende: K.: Korrosion

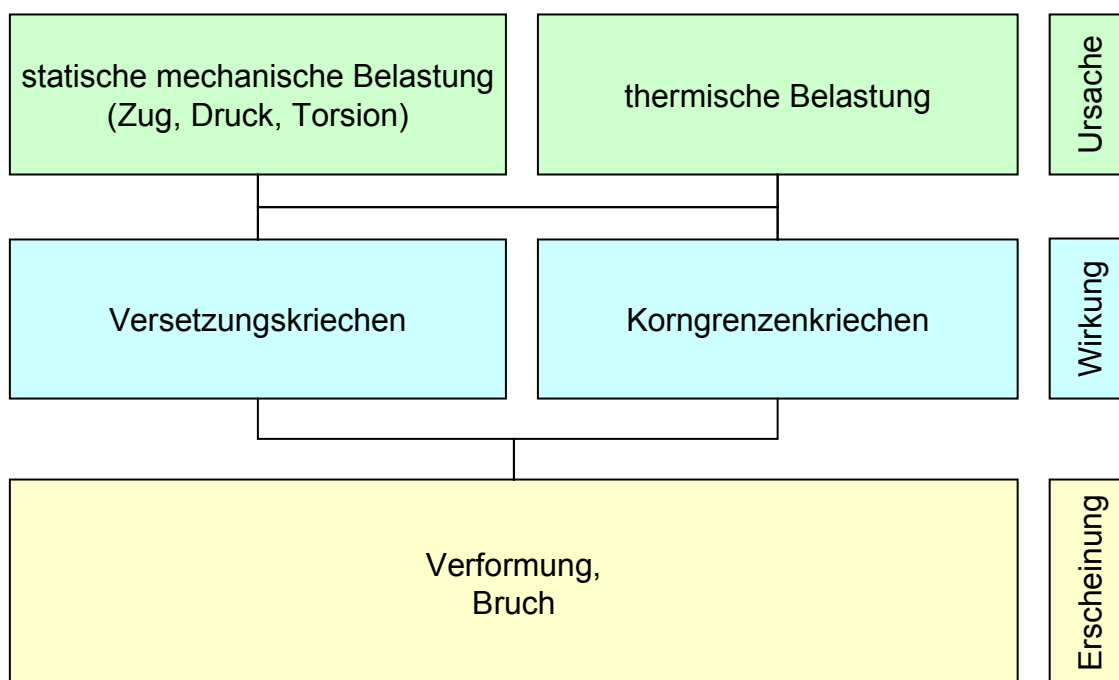
**Bild 6:** Physische Veränderung Korrosion [nach DIN 50900 Teil1, VDI 3822-3]

Nach [DIN 50900] Teil 1 wird unter Korrosion die Reaktion eines metallischen Werkstoffs mit seiner Umgebung verstanden. Die Reaktion bewirkt eine messbare Veränderung des metallischen Werkstoffs und kann zu einer Beeinträchtigung der Funktion des metallischen Bauteils oder eines ganzen Systems führen. In den meisten Fällen ist diese Reaktion elektrochemischer Natur, in einigen Fällen kann sie jedoch auch

chemischer oder metallphysikalischer Natur sein. Es wird angemerkt, dass Reaktionen nichtmetallischer Werkstoffe nicht Gegenstand dieser Norm sind, allerdings die definierten Grundbegriffe sinngemäß auf diese übertragen werden können [HÜT 91]. Die hervorgerufenen Wirkungen können den Ursachen ebenso wie die Erscheinungen den Wirkungen nicht eindeutig zugeordnet werden. Als Produktbeispiel seien hier tragende Metallstrukturen in Brücken genannt, deren Funktion durch Korrosion beeinträchtigt wird. Eine Überwachung der Metallstrukturen mit Hilfe eines Feuchtesensors böte eine Diagnosemöglichkeit dieser Abnutzung.

Die chemischen, elektrochemischen und metallphysikalischen Beanspruchungen können als Ursache der Korrosion nicht spezifisch erfasst werden. Allerdings handelt es sich „in den meisten Fällen“ um eine elektrochemische Reaktion, d.h. mit einer ionenleitenden Phase als Reaktionspartner des Metalls [VDI 3822-3]. Deshalb kann in diesem Fall die Ursache durch Messung der Feuchte erfasst werden. Nur die mechanische Komponente der Ursache kann durch Messung der Größen Beschleunigung, Kraft, Druck, Drehmoment und Dehnung erfasst werden. Wirkungen der Korrosion, die unter Mitwirkung mechanischer Belastung entstehen, können durch Messung der Dehnung erfasst werden. Als Korrosionswirkungen ohne Mitwirkung mechanischer Belastungen kann nur die mikrobiologische Korrosion durch biologische Messung von Mikroorganismen erfasst werden. Viele Erscheinungen können nur durch metallographische Untersuchungen [DIN 50900] und licht- und elektronenmikroskopische sowie analytische Verfahren [VDI 3822-3] unterschieden werden.

#### 2.1.1.5 Kriechen



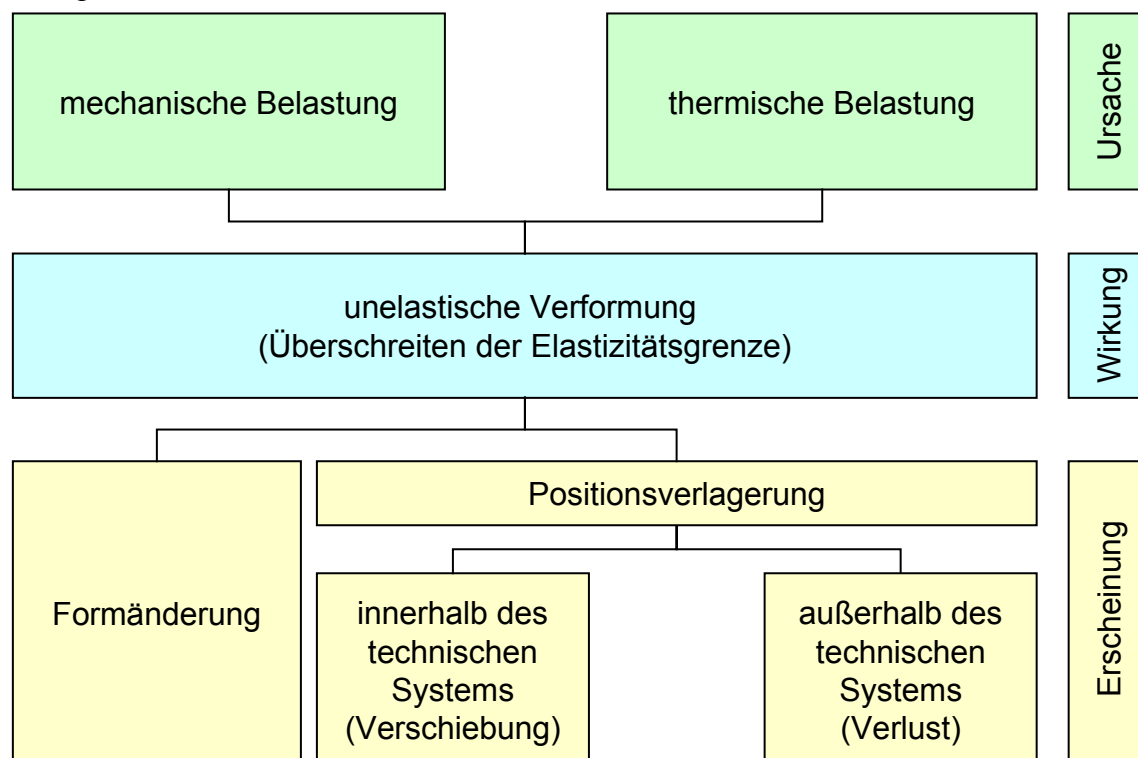
**Bild 7:** Physische Veränderung Kriechen

Als Kriechen wird die bei konstanter mechanischer Langzeitbelastung auftretende zeit- und temperaturabhängige Verformung bezeichnet. Die Wirkungen sind die beiden thermisch aktivierten Prozesse Versetzungs- und Korngrenzenbewegung, die bei von Werkstoffart und Schmelztemperatur abhängigen Temperaturen einsetzen. Kriechen tritt durch Verformung in Erscheinung, die bis zum Bruch von Elastomeren nach [DIN 8013] sowie Metallen und keramischen Werkstoffen nach [HÜT-91] führen kann. Als Produktbeispiel sei hier das Lockern einer Schraube verursacht durch konstante Zugspannung genannt. Eine Überwachung der Vorspannkraft der Schraube böte eine Diagnosemöglichkeit dieser Abnutzung.

Durch eine gleichzeitige Messung der mechanischen und thermischen Belastung kann die Ursache für Kriechen erfasst werden. Kriechen wird erst ab einer werkstoffabhängigen Temperatur verursacht, die bei Metallen im Bereich von 30 bis 40% und keramischen Werkstoffen im Bereich von 40 bis 50% der Schmelztemperatur der Werkstoffe liegt. Die Erfassung der Erscheinungen von Bruch und Verformung wird in Kapitel 2.1.1.2 bzw. Kapitel 2.1.1.6 beschrieben.

### 2.1.1.6 Verformung

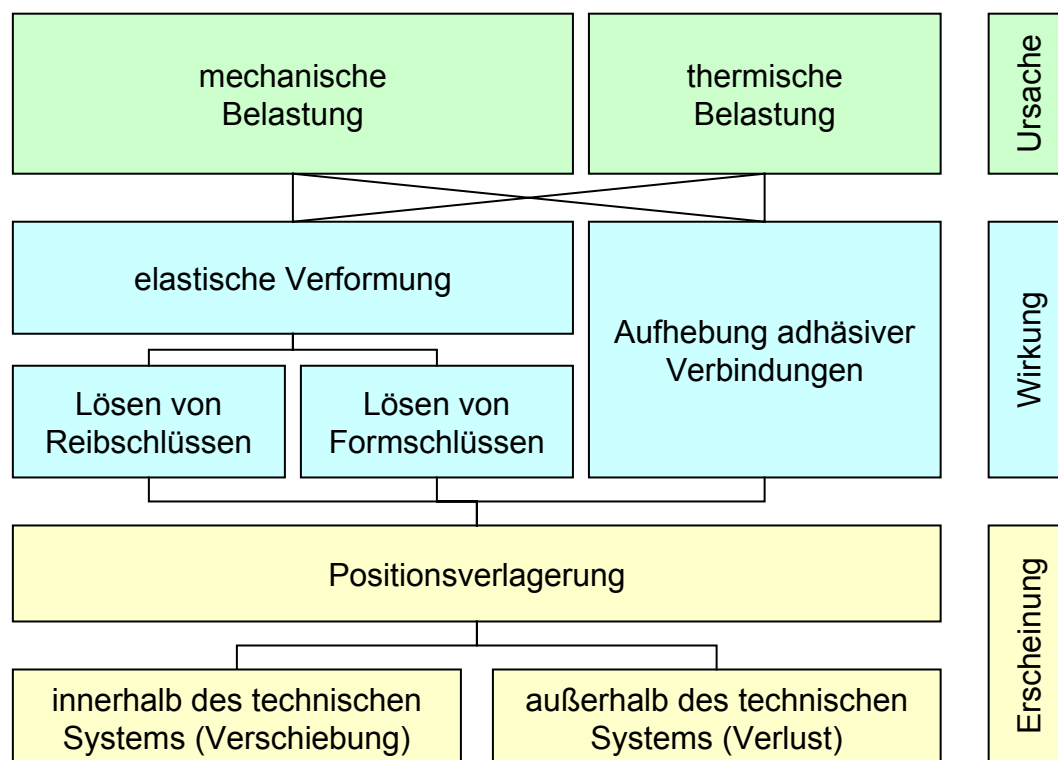
Unter Verformung wird im Folgenden die irreversible Verformung, d.h. die bleibende Verformung auch nach Entlastung verstanden. Die Erscheinungen sind Formänderung und Positionsverlagerung. Die Positionsverlagerung kann zur Verschiebung bzw. zum Verlust eines Bauteils, bedingt durch dessen Verformung bzw. der Verformung eines das Bauteil sichernden Elementes, führen.



**Bild 8:** Physische Veränderung Verformung

Als Produktbeispiel sei ein Lagerschaden bei einem Drehgestell verursacht durch eine Verformung genannt. Eine Überwachung der Lagertemperatur böte eine Diagnosemöglichkeit dieser Abnutzung. Verformung kann durch Messung thermischer und mechanischer Ursachen, Messung der Dehnung zur Erfassung der unelastischen Verformung als Wirkung und der Erscheinungen Form- und Gestaltänderung bzw. Positionsverlagerung erfasst werden. Die Ursachen können durch Messung der Temperatur sowie Messung der mechanischen Einwirkungen Beschleunigung, Kraft, Druck, Dehnung und Drehmoment erfasst werden. Formänderung kann durch Messung von Dicke, Länge und Winkel erfasst werden. Beide Erscheinungen können durch Messung der mechanischen Größen Dicke, Länge und Winkel erfasst werden. Die Positionsänderung äußert sich in Verschiebung oder Verlust, die zusammen eine eigene Klasse der physischen Veränderungen bilden und deren Erfassung in Kapitel 2.1.1.7 beschrieben wird. Im Unterschied zur Verformung ist eine Formänderung bei der physischen Veränderung Verschiebung/Verlust reversibel.

### 2.1.1.7 Verschiebung/Verlust



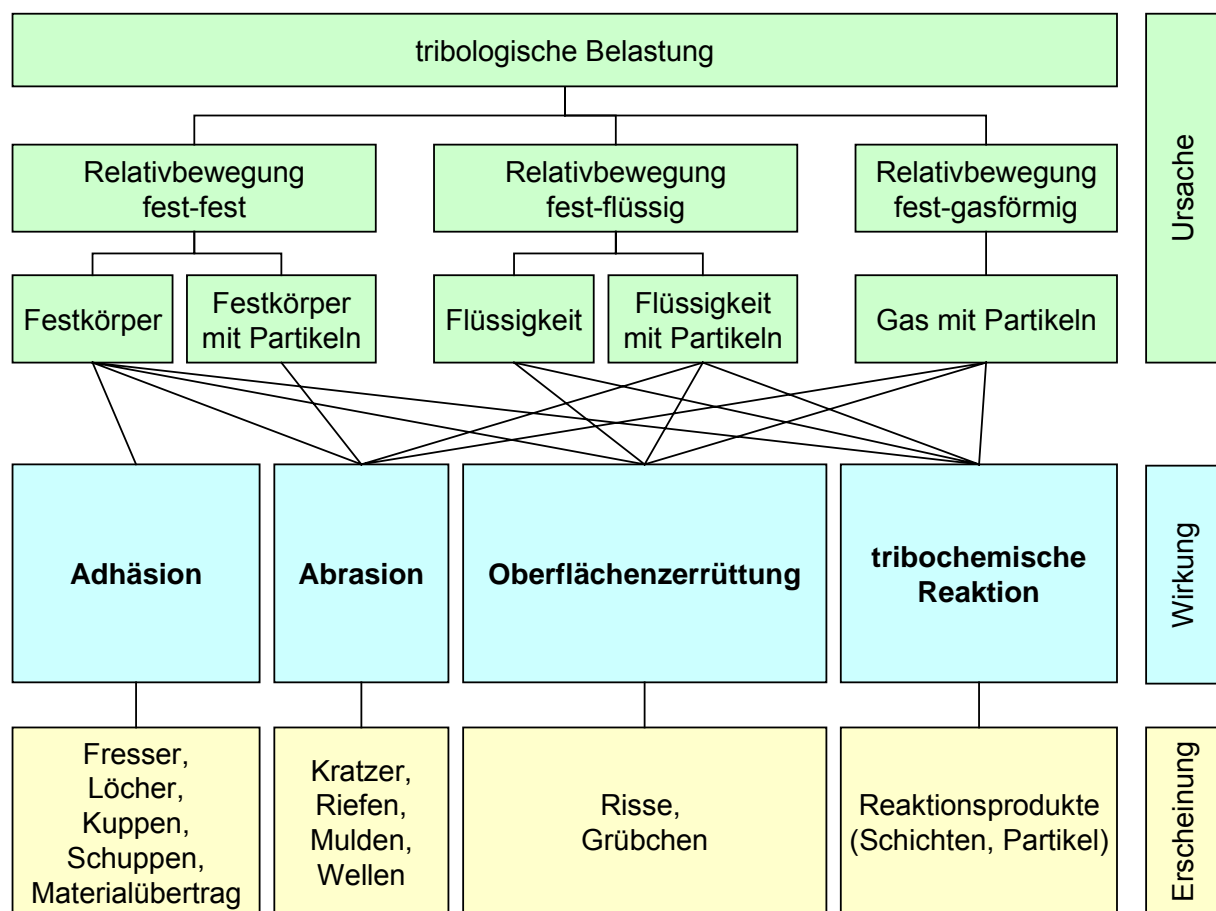
**Bild 9:** Physische Veränderung Verschiebung/Verlust

Sowohl reibschlüssige (Stift-) als auch formschlüssige (Schraub-) Verbindungen erfordern die Aufrechterhaltung von elastischen Verformungen. Solche Verbünde können durch mechanische oder thermische Einflüsse gelöst werden. Die Lösung einer form- oder reibschlüssigen Verbindung kann die Verschiebung oder den Verlust eines Bauteils zur Folge haben. Durch Aufhebung einer adhäsiven Verbindung werden die beiden Fügepartner und das adhäsive Medium getrennt. Dabei wird die Adhäsiv-

onskraft zwischen adhäsivem Medium und Fügepartner durch mechanische und thermische Belastung überwunden. Aufgrund einer Positionsverlagerung werden Komponenten in Relation zu anderen Komponenten verschoben. Als Produktbeispiel sei eine durch thermische Belastung hervorgerufene reversible Formänderung einer Getriebewelle genannt. Durch diese Verformung können die Getriebezahnräder nicht mehr einwandfrei ineinander greifen. Eine Körperschallmessung der Welle böte eine Möglichkeit diese Abnutzung zu erfassen.

Die Ursachen von Verschiebung und Verlust können durch Messung der thermischen und mechanischen Einwirkungen erfasst werden. Die Wirkungen ‚Lösen von Reib- und Formschlüssen‘ bzw. ‚Aufheben adhäsiver Verbindungen‘ können durch Messung der auf diese Verbindungen wirkenden Beschleunigungen, Drehmomente, Drücke und Kräfte erfasst werden. Beide Erscheinungsformen können durch Messung geometrischer Größen eines Produktes wie Dicke, Länge, Position und Winkel erfasst werden.

### 2.1.1.8 Verschleiß

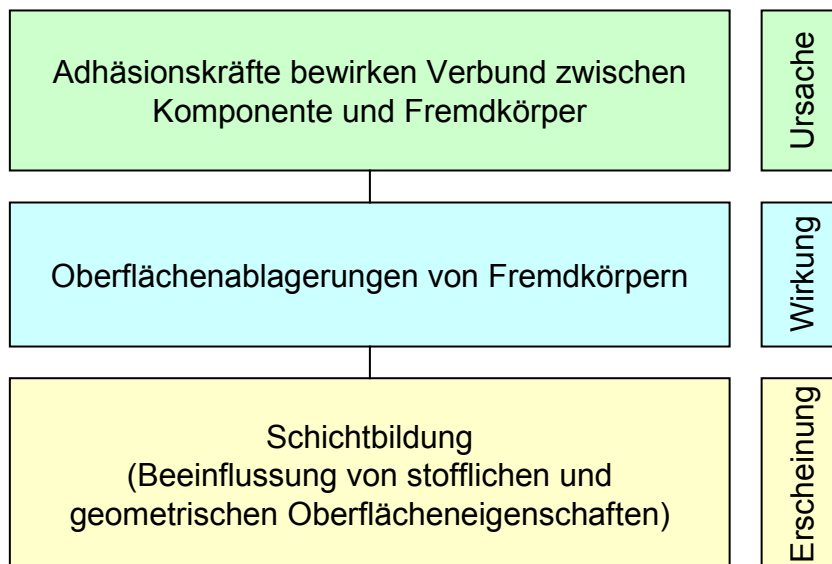


**Bild 10:**      Physische Veränderung Verschleiß [nach DIN 50320, VDI 3822-5, WUT-87]

Bei der Bezeichnung *abrasiver Verschleiß* und *adhäsiver Verschleiß* wird der Vorgang der Krafteinwirkung, d.h. die Reibwechselwirkung, herangezogen. Dagegen wird beim *korrosiven Verschleiß* (tribochemische Reaktionen) und beim *Ermüdungsverschleiß* (Oberflächenzerrüttung) die Stoffänderung im Reibprozess zugrunde gelegt. *Abrasiver* und *adhäsiver Verschleiß* erfolgen nur bei direktem Kontakt bzw. bei gegenseitiger Durchdringung fester Reibpartner. *Korrosiver Verschleiß* und *Ermüdungsverschleiß* können auch bei getrennten Reibkörpern, d.h. bei Flüssigkeitsreibung, auftreten [DIN 50320, VDI 3822-5, WUT-87]. Als Produktbeispiel sei ein durch ungenügende Schmierung verursachtes Klemmen des Kolbens in der Zylinderlaufbuchse eines Verbrennungsmotors genannt. Die Überwachung der Schmierung böte eine Diagnosemöglichkeit dieser Abnutzung.

Die Ursache von Verschleiß ist eine Relativbewegung von Festkörpern zu Festkörpern, Flüssigkeiten mit und ohne festen Partikeln sowie Gasen mit festen Partikeln. Relativbewegungen zwischen zwei Festkörpern können durch Messung von Beschleunigung (Körperschallmessung), Länge und Winkel, zwischen Festkörper und Flüssigkeit sowie Gas durch Messung des Durchflusses erfasst werden. Nur die Wirkung Adhäsion kann durch Messung der Adhäsionskraft erfasst werden. Als Erscheinung können Reaktionsprodukte aus tribochemischen Reaktionen mit chemischen Sensoren erfasst werden.

#### 2.1.1.9 Verschmutzung



**Bild 11**      Physische Veränderung Verschmutzung

Bedingt durch Adhäsionskräfte kann es zu Oberflächenablagerungen von Fremdkörpern kommen, die eine Beeinflussung von Oberflächeneigenschaften zur Folge haben. Unter Oberflächeneigenschaften werden die biologischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften verstanden. Beispiele sind Einwirkungen auf eine

Membran durch Mikroorganismen als biologische Beeinflussung, Einwirkungen auf einen Katalysator als chemische Beeinflussung, auf einen Reflektor als optische, auf eine Reibfläche als mechanische, auf einen Isolator als elektrische und auf eine Antenne als elektromagnetische physikalische Beeinflussung. Als Produktbeispiel sei die Verschmutzung eines chirurgischen Instruments mit Keimen genannt. Die Überwachung des Verpackung des Instruments mit Hilfe eines biologischen Sensors böte eine Diagnosemöglichkeit dieser Abnutzung. Als Ursache kann die Anwesenheit von Fremdkörpern, d.h. in Gas gelöster Staub, mit Hilfe einer Partikelmesstechnik erfasst werden. Biologische Fremdkörper (Organismen) können durch Biosensoren erfasst werden. Die Wirkung der adhäsiv angelagerten Stoffe sind Oberflächenablagerungen, die zu einer Schichtbildung als Erscheinung der Verschmutzung führen.

Sowohl Oberflächenablagerungen als auch die gebildeten Schichten können durch Messung der durch sie beeinflussten geometrischen und stofflichen Eigenschaften der Komponente erfasst werden. Hierzu bieten sich die Messung von Dicke, Länge und Winkel zur Erfassung der geometrischen Eigenschaften an. Die stofflichen Eigenschaften werden in biologische, chemische und physikalische eingeteilt. Die biologischen und chemischen Eigenschaften können spezifisch durch einen biologischen bzw. chemischen Sensor mit großer analytischer Bandbreite erfasst werden.

#### **2.1.1.10 Erfassung**

In diesem Unterkapitel wird ausgeführt, welche Messtechnik der LCU aus welchen Gründen nicht zur Verfügung steht. Als Zusammenfassung der Kapitel 2.1.1.1 bis 2.1.1.9 werden die Messgrößen zur Erfassung der physischen Veränderungen in Tabellenform dargestellt. Mit Hilfe der im Anhang aufgelisteten für die LCU relevanten Messgrößen können den physischen Veränderungen Sensoren zugeordnet werden. Die physischen Veränderungen können nicht direkt erfasst werden, da es z.B. keinen „Alterungssensor“ oder „Kriechsensor“ gibt. Deshalb müssen sie über die bekannten Hilfsgrößen der nichtelektrischen Messtechnik bestimmt werden. Es werden Aussagen zur Erfassung der physischen Veränderung in allen drei Ebenen der physischen Veränderung Ursache, Wirkung und Erscheinung getroffen. Hierbei werden nur spezifisch zu erfassende Ursachen, Wirkungen und Erscheinungen betrachtet. Spezifisch bedeutet, dass durch Messung einer oder weniger bekannter Größen eine physische Veränderung bestimmt werden kann. Unspezifisch bedeutet, dass eine physische Veränderung nur durch Messung vieler biologischer, chemischer oder physikalischer Größen erfasst werden kann. So müssten z.B. zur Erfassung der Erscheinung „Schichtbildung“ der physischen Veränderung „Verschmutzung“ eine Vielzahl stofflicher und geometrischer Oberflächeneigenschaften mit Hilfe von physikalischen Sensoren erfasst werden.

Weiterhin werden nur solche Messgrößen betrachtet, die durch die LCU nicht zerstörend, ohne externe Messtechnik und unverzüglich in Echtzeit erfasst werden können. Zerstörend sind z.B. Verfahren zur Messung der Härte, bei denen ein Prüfkörper in den Werkstoff eindringt. Beispiele für externe Messtechnik sind spektroskopische Messverfahren der Konzentrations- und Analysemesstechnik, bei denen die LCU eine Probe entnehmen und zwecks Messung außerhalb des Produktes weiterreichen müsste. Diese Messung würde mit Verzug erfolgen. Optische Sensorsysteme bestehend aus einem CCD-Sensor mit nachgeschalteter Bildverarbeitungssoftware werden nicht betrachtet, da die LCU Belichtungstechnik zur Ausleuchtung der Szene mitführen müsste. In Tabelle 1 sind die Messgrößen zur Erfassung von physischen Veränderungen nach Erfassungsebene geordnet aufgelistet.

Erfassungsebene physische Veränderung	Ursache	Wirkung	Erscheinung
Alterung	Temperatur, Zeit biologische und chemische Größen	biologische und chemische Größen	chemische Größen
Bruch	Beschleunigung, Dehnung, Drehmoment, Druck, Kraft, Temperatur	Dehnung, Leitfähigkeit	Dehnung
Ermüdung	Beschleunigung, Dehnung, Drehmoment, Druck, Kraft, Temperatur, Zeit	-	Dehnung
Korrosion	Beschleunigung, Dehnung, Drehmoment, Druck, Feuchte, Kraft, chemische Größen	biologische Größen, Dehnung	-
Kriechen	Drehmoment, Druck, Kraft, Temperatur	-	Dehnung, Dicke, Länge, Position, Winkel
Verformung	Beschleunigung, Dehnung, Drehmoment, Druck, Kraft, Temperatur	Dehnung, Länge, Winkel	Dicke, Länge, Position, Winkel
Verschiebung/Verlust	Beschleunigung, Dehnung, Drehmoment, Druck, Kraft, Temperatur	Kraft	Dicke, Länge, Position, Winkel
Verschleiß	Beschleunigung, Dicke, Durchfluss, Länge, Partikel, Position, Winkel	chemische Größen, Kraft (Adhäsion)	chemische Größen (Reaktionsprodukte)
Verschmutzung	Partikel, biologische Größen	biologische Größen	

Tabelle 1: Messgrößen zur Erfassung von physischen Veränderungen



Allgemein muss festgestellt werden, dass die Ursachen bei den meisten physischen Veränderungen zwar einfach zu erfassen sind, deren eindeutige Zuweisung zu einer Wirkung und Erscheinung allerdings sehr schwierig oder gar nicht möglich ist. Wichtiger als die genaue Bestimmung der Wirkung oder Erscheinung ist die rechtzeitige Erfassung der Ursache einer physischen Veränderung. Nur die Reaktion auf der Ursachenebene kann einen Schaden aufgrund bereits eingetretener Wirkungen und Erscheinungen der physischen Veränderung durch Anpassung verhindern. Hierzu muss die Ursache von physischen Veränderungen durch die LCU rechtzeitig erfasst werden. Die Erfassung auf der Wirkungsebene bietet den Vorteil, dass die physische Veränderung noch nicht sichtbar geworden ist, d.h. ihre Erscheinungen können noch verhindert werden. Auch die Erfassung der Erscheinungen bietet immer noch den Vorteil, dass Folgeschäden an anderen Komponenten und Produkten verhindert werden können. Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, verbleiben vierzehn für die LCU geeignete physikalische Messgrößen Beschleunigung, Dehnung, Dicke, Drehmoment, Druck, Durchfluss, Feuchte, Kraft, Länge, Partikel, Position, Temperatur, Winkel und Zeit sowie die durch Bio- und Chemochips zu messenden (Mikro-) Organismen und Analyten.

Neben der Entwicklung von Zuverlässigkeitsmodellen zur Vorhersage und Sensorsystemen zur Erfassung von physischen Veränderungen muss ein Ziel weiterer Arbeiten die intelligente Verknüpfung von wenigen Sensorsignalen sein, um spezifische Aussagen bezüglich Ursachen einer physischen Veränderung treffen zu können. Die Entwicklung von Modellen und Algorithmen zur Verknüpfung von Zuverlässigkeitsmodellen von Produkten und Komponenten würde einen weiteren Ansatz zur Reduzierung der benötigten Messgrößen bei gleichzeitiger Steigerung der Aussagesicherheit von erfassten physischen Veränderungen bieten. Die vierzehn hier benannten physikalischen sowie die biologischen und chemischen Messgrößen bilden den Pool für die Erfassung von physischen Veränderungen und der Sensoren des Untersystems Sensorik. Im Anhang werden Messprinzipien und Sensoren zur Messung der physikalischen Größen benannt.

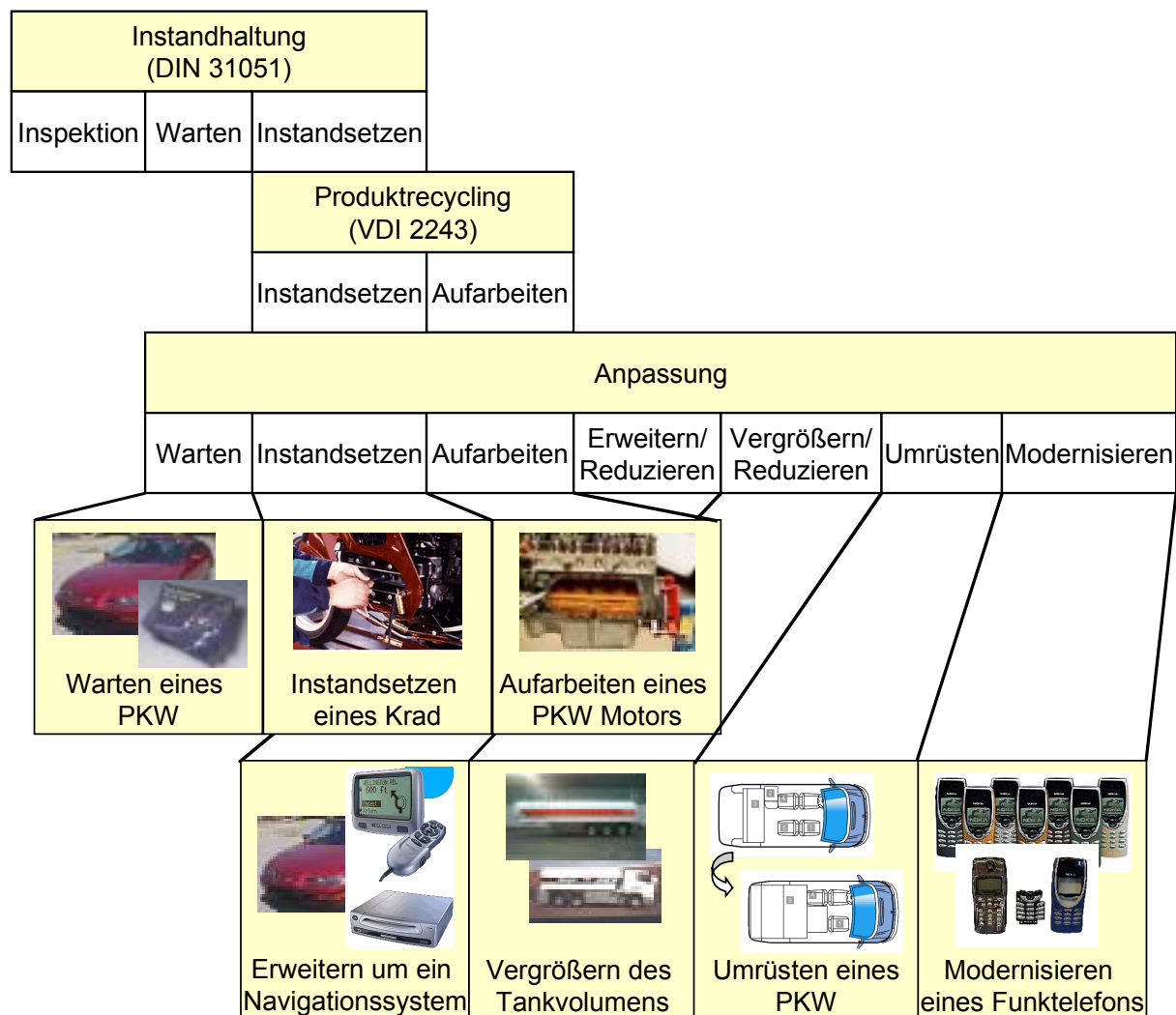
### **2.1.2      Veränderte Anforderungen**

Veränderte Anforderungen können aus technischem Fortschritt, Gesetzesänderungen, Wertewandel oder Modeentwicklungen resultieren und sind auf umgebungsbedingte Faktoren wie Politik, Gesellschaft, Wirtschaft und Nutzung zurückzuführen. Die veränderten Anforderungen werden durch die LCU in Form von gespeicherten Kenngrößen abgebildet, die dem Produkt während der Herstellung und bei Änderung auch in der Nutzungsphase zur Verfügung gestellt werden. Durch Vergleich dieser Kenngrößen mit durch Sensoren erfassten Messwerten überprüft die LCU, ob die veränderten Anforderungen noch erfüllt werden.

Als Beispiel für die Überwachung der Erfüllung veränderter Anforderungen wird der Schadstoffausstoß eines Pkw betrachtet: Beim Kauf eines Neuwagens im Jahre 2000 galt ein Grenzwert für CO<sub>2</sub>-Emission von 200 g/km. Ab 2005 gelte ein Grenzwert von 150 g/km. Diese umweltgesetzlich begründete veränderte Anforderung wird der Pkw-LCU im Rahmen eines Anpassungsaufenthalts in der Werkstatt als Kennwert „maximale CO<sub>2</sub>-Emission: 150 g/km“ mitgegeben, den die LCU mit Hilfe eines CO<sub>2</sub>-Sensors überwachen kann. Mit integrierter LCU kann jeder Pkw-Besitzer rechtzeitig vor Eintritt der Gültigkeit der veränderten Anforderung erreicht und proaktiv tätig werden.

## 2.2 Anpassung

Anpassung erschließt neue Nutzungsphasen nach Abnutzung in bisheriger Nutzungsphase. Anpassung umfasst Produktrecycling nach VDI 2243 und Instandhaltung nach DIN 31051 ohne Inspektion. In Bild 12 ist der Zusammenhang zwischen Instandhaltung, Produktrecycling und Anpassung dargestellt.



**Bild 12:**

Zusammenhang zwischen Instandhaltung, Produktrecycling und Anpassung nach [MÜL-01]

Die Instandhaltung besteht aus den Maßnahmen der Wartung, Inspektion und Instandsetzung. Das Ziel der Wartung ist die Bewahrung des Sollzustandes, der Inspektion die Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes und der Instandsetzung die Wiederherstellung des Sollzustandes eines technischen Produktes.

Zwar wird auch bei der Aufarbeitung der Sollzustand hergestellt, jedoch unterscheidet sie sich von der Instandsetzung in der Höhe des erzielten Abnutzungsvorrats: die Instandsetzung dient lediglich der Schaffung eines zeitwertgerechten Sollzustands, die Aufarbeitung der Herstellung des Sollzustands eines neuwertigen Produktes. Wartung, Instandsetzung und Aufarbeitung sind keine Reaktion auf veränderte Anforderungen. Funktion und Gestalt des Produktes bleiben erhalten bzw. werden wieder hergestellt. Technischer Fortschritt, Gesetzesänderungen, Modeentwicklungen, Wertewandel und gewandelte Nutzung fordern jedoch eine veränderte Funktion und/oder Gestalt des Produktes. Die Anpassungsarten sind daher um Modernisieren, Umrüsten, Erweitern, Reduzieren, Vergrößern und Verkleinern ergänzt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich des Ausmaßes der Funktions- und/oder Gestaltveränderungen des Produktes [SEL-97].

Die Anpassungsarten beinhalten damit bekannte Prozesse aus der Instandhaltung und dem Produktrecycling. Neben der Zu- und Abfuhr von Komponenten sind für eine Anpassung Fertigungsprozesse nach [DIN 8580] erforderlich. In der Regel erfordert Anpassung Demontage und Remontage. Die Demontage dient dazu, den Zugang zu den Komponenten eines Produktes zu ermöglichen. Des weiteren werden bei einer Anpassung häufig Reinigungsprozesse eingesetzt. Die Auswahl weiterer Fertigungsprozesse ist sehr komponenten- und abnutzungsspezifisch. So kommen Verfahren aus der Kategorie der Trennverfahren wie Spanen oder Abtragen, aber auch Prozesse aus den Kategorien Umformen oder Beschichtung zum Einsatz. Erfolgt eine Anpassung immateriell, z.B. nur durch Softwareanpassung, so sind keine Fertigungsprozesse erforderlich. Beispielsweise können viele Zusatzfunktionen moderner Telefone oder Set-Top-Boxen allein durch Softwareänderungen freigeschaltet oder gesperrt werden. Durch Erfassung der Abnutzung in Art und Grad sowie Berücksichtigung der Anforderungen der nächsten Nutzungsphase kann die LCU die nach Art und Umfang passende Anpassung bestimmen und steuern.

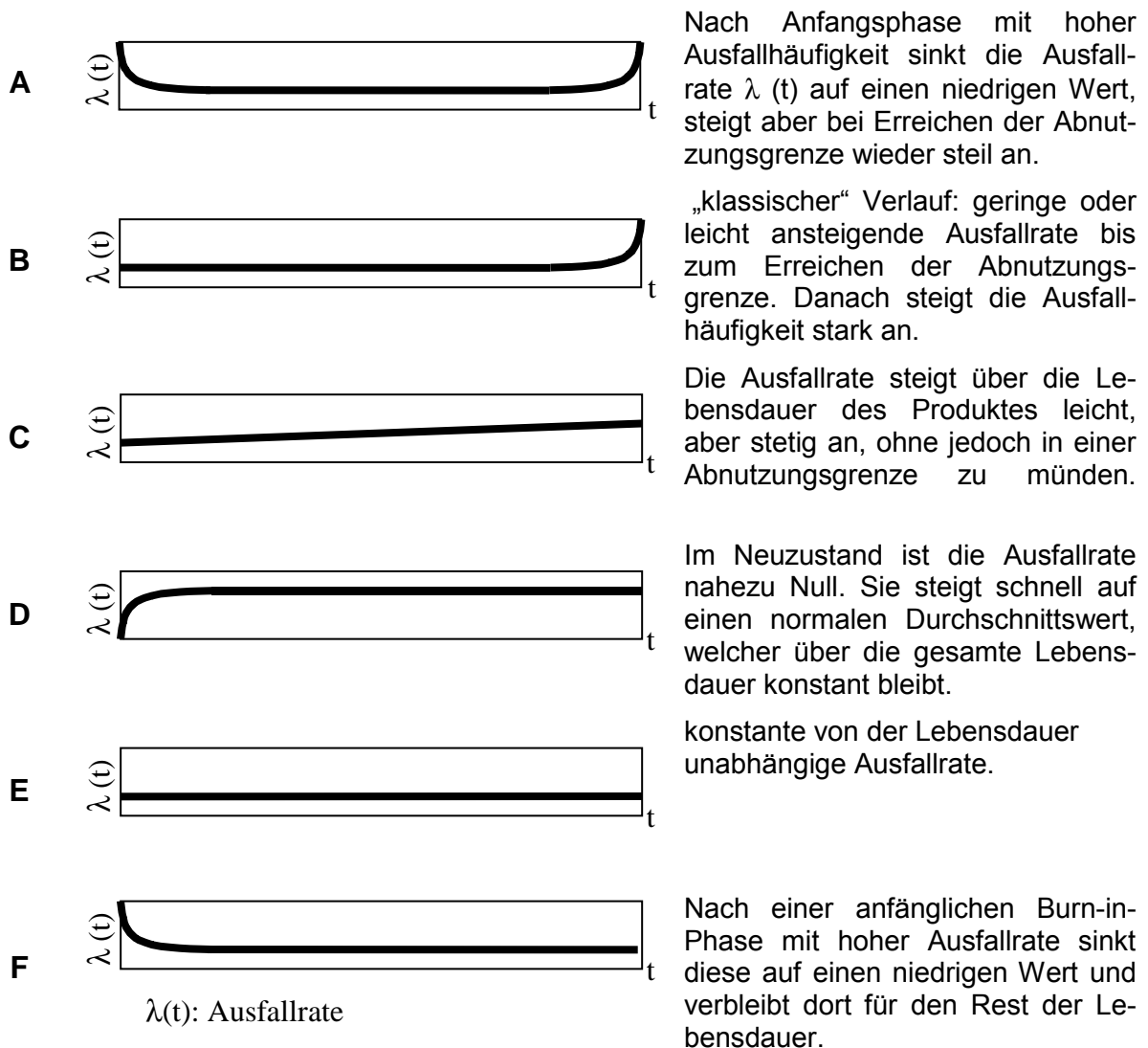
## **2.3 Bereitstellung von Abnutzungsinformationen**

Heute werden Informationen über die Abnutzung von Bauteilen, Komponenten oder Produkten aus Zuverlässigkeitsanalysen und Feldeinsätzen gewonnen.

### **2.3.1 Zuverlässigkeitsanalyse**

Die Zuverlässigkeit eines Produktes ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass es während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedin-

gungen nicht ausfällt [OCO-90]. Die Ziele von Zuverlässigkeitsanalysen in der Entwicklungsphase sind die Prognose der erwarteten Zuverlässigkeit und die Erkennung und Beseitigung von Schwachstellen eines Produktes. Das zu untersuchende Produkt wird dazu als System angesehen, das aus mehreren Systemelementen aufgebaut ist. Zuverlässigkeitsanalysen lassen sich in quantitative Methoden wie Failure Tree Analysis FTA (Fehlerbaumanalyse), Markoff und Boole sowie qualitative Methoden wie Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse FMEA und Checklisten unterteilen. Die quantitativen Methoden ermitteln das Ausfallverhalten mit Hilfe der Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie, wohingegen mit qualitativen Methoden eine systematische, erfahrungsbasierte Suche nach Schwachstellen und ihren Auswirkungen durchgeführt wird. Das Ausfallverhalten des Systems wird mit Hilfe einer Systemtheorie bestimmt, die die Zuverlässigkeiten der Systemelemente durch eine Zuverlässigkeitsanalyse verknüpft [BER-99]. In Bild 13 sind die sechs Typen von Ausfallkurven heutiger komplexer technischer Produkte dargestellt.



**Bild 13:** Sechs Typen von Ausfallkurven heutiger komplexer technischer Produkte [TAA-00]

Nach [TAA-00] weisen heutige technische Produkte aufgrund ihrer Komplexität ein anderes Ausfallverhalten auf, als Produkte, die noch vor 15 Jahren entwickelt wurden. Während ältere Produkte meistens über eine lange Zeitspanne sehr zuverlässig funktionieren und sich dann schnell abnutzen (Bild 13 Typ B), kann man dieses Ausfallverhalten heute nur noch bei simplen oder komplexen Maschinen mit direktem Kontakt zum Produktionsgut wie z.B. Brechmaschinen, Saugpumpen oder Schneckenförderern beobachten. Komplexe Maschinen ohne direkten Kontakt zum Produktionsgut nutzen sich abweichend vom „klassischen“ Ausfallverhalten (Bild 13 Typ B) früherer Maschinen nach fünf anderen Ausfallkurven ab, die auch in Bild 13 dargestellt sind: Untersuchungen der Luftfahrtindustrie zeigen, dass 4% aller untersuchten Komponenten in ihrem Ausfallverhalten zum Typ A in Bild 13 zu rechnen sind, nur 2% folgen dem klassischen Typ B, 5% folgen Typ C, 7% sind Typ D zuzuordnen, 14% gehören dem Typ E an und 68% aller Ausrüstungsgegenstände lassen sich Typ F zuordnen. Damit trifft für Geräte der Luftfahrtindustrie die Aussage zu, dass je komplexer eine Komponente ist, desto wahrscheinlicher ihr Ausfallverhalten dem Ausfallverhalten E und F zuzuordnen ist. Diese Ergebnisse widersprechen der weitverbreiteten Annahme, dass es immer einen Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit und zunehmender Betriebsdauer gebe. Bis auf einige simple oder im direktem Kontakt zum Produktionsgut stehende Produkte mit eindeutigen Ausfallverläufen kann bei komplexen Produkten übermäßige Wartung die generelle Fehlerrate sogar erhöhen, indem sie Burn-In-Ausfälle bei ansonsten stabilen Systemen erzeugt. Bei komplexen Produkten sollte deshalb der Anpassungsumfang nicht an die Betriebsdauer angelehnt geplant, sondern abhängig vom jeweiligen Produktzustand bestimmt werden. Hierzu kann die LCU als produktbegleitendes System den Produktzustand bereitstellen.

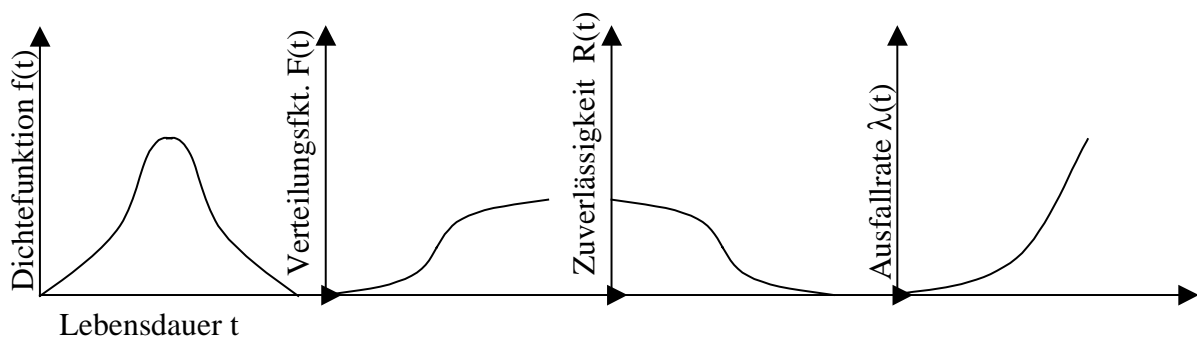
Das Ausfallverhalten der einzelnen Systemelemente eines Produktes wird mit Hilfe von Lebensdauer-Verteilungen beschrieben. Die Dichtefunktion  $f(t)$  einer Lebensdauer-Verteilung gibt an, wie viele Systemelemente zu einem Zeitpunkt ausfallen. Die Verteilungsfunktion  $F(t)$  ist gleichbedeutend mit der Ausfallwahrscheinlichkeit und gibt als Integral der Dichtefunktion über der Lebensdauer an, wie viele Systemelemente zu einem Zeitpunkt insgesamt ausgefallen sind. Die Überlebenswahrscheinlichkeit  $R(t)$  ist gleichbedeutend mit der Zuverlässigkeit und ist das Komplement der Ausfallwahrscheinlichkeit. Die Ausfallrate  $\lambda(t)$  als Quotient aus Dichtefunktion und Zuverlässigkeit stellt ein Maß für das Risiko eines Ausfalls dar und gibt prozentuell an, wie viele der zu einem Zeitpunkt noch nicht ausgefallenen Systemelemente ausfallen werden.

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad \text{Verteilungsfunktion (Ausfallwahrscheinlichkeit)}$$

$$R(t) = 1 - F(t) \quad \text{Überlebenswahrscheinlichkeit (Zuverlässigkeit)}$$

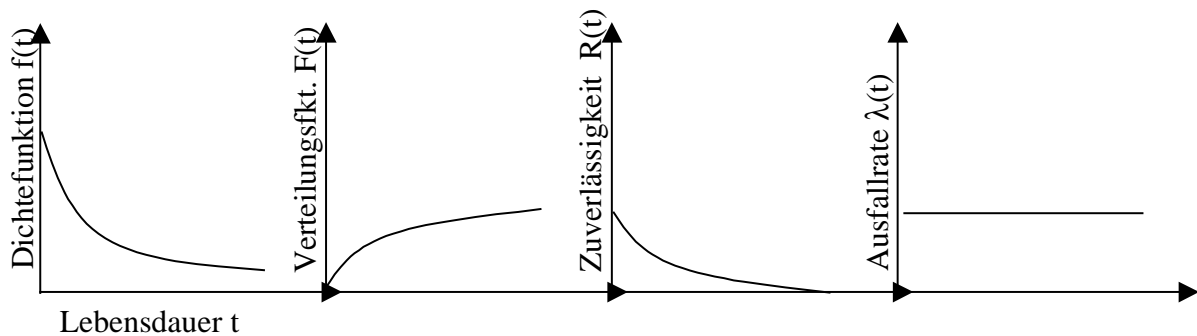
$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad \text{Ausfallrate}$$

Die bekannteste Lebensdauer-Verteilung ist die Normal-Verteilung (Bild 14), die jedoch in der Zuverlässigkeitstheorie selten angewendet wird, da die wenigsten elektrischen, elektronischen oder mechanischen Systemelemente ein normalverteiltes Ausfallverhalten aufweisen.



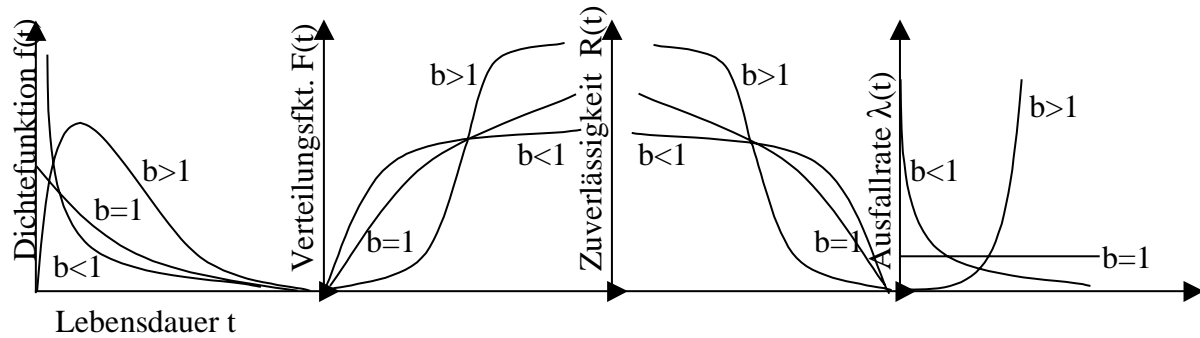
**Bild 14:** Normal-Verteilung

Die Exponential-Verteilung (Bild 15) wird häufig für elektrische und elektronische Bauteile verwendet, da sie vermehrt am Anfang der Lebensdauer ausfallen. Dieses Ausfallverhalten wird sehr gut durch den Verlauf der Dichtefunktion der Exponential-Verteilung beschrieben.



**Bild 15:** Exponential-Verteilung

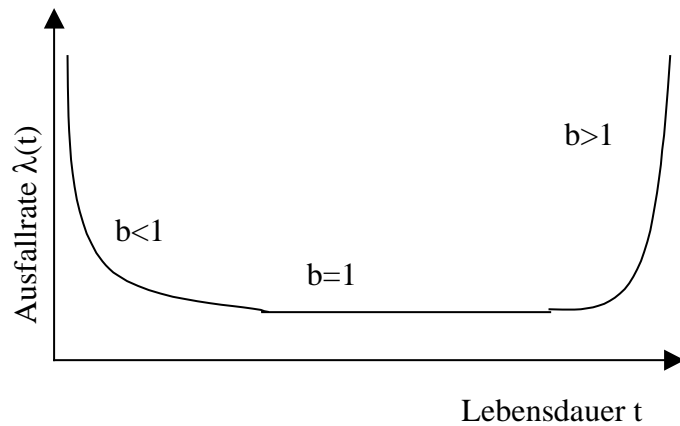
Für mechanische Systemelemente wird am häufigsten die Weibull-Verteilung verwendet (Bild 16 und Bild 17).



**Bild 16:** Weibull-Verteilung (zweiparametrische Form)

Die Weibull-Verteilung weist drei Bereiche auf, die unterschiedliche Ausfallursachen beschreiben. Bereich 1 (Formparameter  $b < 1$ ) ist durch eine abnehmende Ausfallrate gekennzeichnet. Das Risiko eines Bauteils auszufallen nimmt hier mit zunehmender Zeit ab. Ursachen dieser Frühausfälle sind „Kinderkrankheiten“ [GEI-94] bedingt durch Montage-, Fertigungs-, Werkstoff- oder Konstruktionsfehler, auch „Burn-In-Ausfälle“ genannt [TAA-00]. Im Bereich 2 ( $b = 1$ ) ist die Ausfallrate konstant klein. Ursachen der Zufallsausfälle sind z.B. Bedienungs- und Wartungsfehler oder Materialfehler. Bereich 3 ( $b > 1$ ) beschreibt das durch physische Veränderungen bedingte Ausfallverhalten und ist gekennzeichnet durch eine stark ansteigende Ausfallrate. Bisher gibt es nur sehr wenige gesammelte und aufbereitete Informationen über das Ausfallverhalten von mechanischen Bauteilen. Am Institut für Maschinenelemente und Gestaltungslehre der Universität Stuttgart wird deshalb eine Zuverlässigkeits-Datenbank gepflegt [BER-89]. Elektrische und elektronische Systemelemente neigen hauptsächlich zu Frühausfällen und werden deshalb in ihrem Ausfallverhalten sehr gut durch eine Exponential-Verteilung, die dem Bereich 1 der Weibull-Verteilung entspricht, beschrieben. Das Ausfallverhalten dieser Bauteile ist sehr stark temperaturabhängig [BEC-95]. Nach [SCH-79] senkt eine Absenkung der Gehäusetemperatur von  $100^\circ\text{C}$  auf  $80^\circ\text{C}$  die Ausfallrate elektrischer und elektronischer Systemelemente auf ein Drittel.

Vergleichende Untersuchungen der Zuverlässigkeit von Bauelement und Verbindungsstelle ergeben, dass die Verbindungsstelle im quasistationären Bereich deutlich zuverlässiger ist als das Bauelement. Das Ende des Arbeitsbereiches, d.h. der Beginn der Materialermüdung, setzt bei SMD-Kontakten deutlich vor den Bauelementen selbst ein. Dieser Effekt verstärkt sich bei zunehmender Steifigkeit des Aufbaus wie z.B. bei Abnahme der Pinlänge. Wesentliche Ausfallursachen für Verbindungsstellen sind Temperaturwechselzyklen, Biegewechselbelastungen und Vibrationen. [LIN-98]



**Bild 17:** Ausfallrate der Weibull-Verteilung (dreiparametrische Form)

Die Weibull-Verteilung lässt sich in einer zweiparametrischen und einer dreiparametrischen Form darstellen:

zweiparametrische Form

$$\lambda(t) = \frac{b}{T} \left( \frac{t}{T} \right)^{b-1}$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

$$f(t) = \frac{dF}{dt} = \frac{b}{T} \left( \frac{t}{T} \right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

dreiparametrische Form

$$\lambda(t) = \frac{b}{T - t_0} \left( \frac{t - t_0}{T - t_0} \right)^{b-1}$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t - t_0}{T - t_0}\right)^b}$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t - t_0}{T - t_0}\right)^b}$$

$$f(t) = \frac{dF}{dt} = \frac{b}{T - t_0} \left( \frac{t - t_0}{T - t_0} \right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t - t_0}{T - t_0}\right)^b}$$

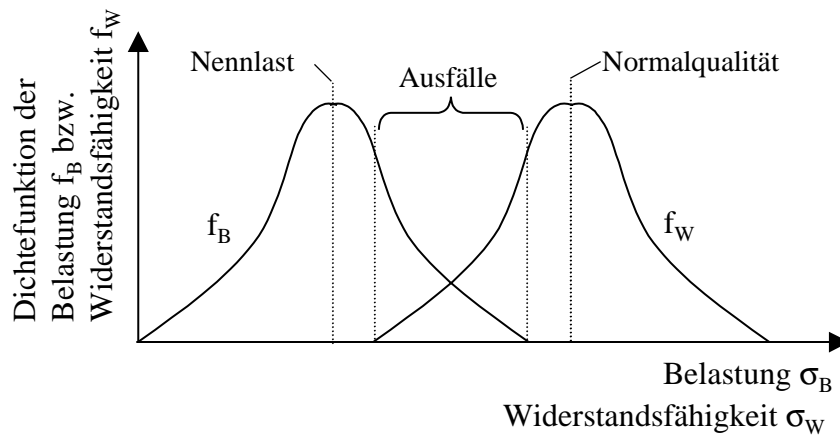
mit:  $\lambda(t)$ : Ausfallrate  
 $R(t)$ : Überlebenswahrscheinlichkeit  
 $F(t)$ : Ausfallwahrscheinlichkeit  
 $f(t)$ : Dichtefunktion der Ausfallwahrscheinlichkeit  
 $T$ : charakteristische Lebensdauer  
 $b$ : Formparameter  
 $t_0$ : ausfallfreie Zeit

Die charakteristische Lebensdauer  $T$  wird auch als Zeitkonstante bezeichnet. Zum Zeitpunkt  $t = T$  nimmt die Überlebenswahrscheinlichkeit den Wert  $1/e \approx 0,368$  an, d.h. dass bis zu diesem Zeitpunkt ca. 63,2% der Bauteile ausgefallen sind. Der Formparameter  $b$  ist durch den vorherrschenden Ausfallmechanismus bestimmt. Die ausfallfreie Zeit  $t_0$  markiert den Zeitpunkt, bis zu dem statistisch keine Ausfälle auftreten. Bei  $t_0 = 0$  geht die dreiparametrische in die zweiparametrische Weibull-Verteilung über.



Die in Lebensdauerversuchen oder aus Schadensstatistiken ermittelten Ausfallzeiten streuen zum Teil erheblich. Das Verhalten der Bauteile ist bei gegenseitiger Abhängigkeit im System wenig erforscht, d.h. es fehlt der Zusammenhang zwischen der Lebensdauer im Ein-Stufen-Versuch (Wöhlerversuch) und der Lebensdauer bei Lastkollektiven (Lebensdauerlinie). Ergebnisse des Wöhlerversuches für ein Zahnrad zeigen dies beispielhaft sehr deutlich: Trotz identischer Randbedingungen und Belastungen ergaben sich recht unterschiedliche Ausfallzeiten [GRO-74]. Einem Bauteil kann somit keine bestimmte ertragbare Lastwechselzahl zugeordnet werden. Die Lastwechselzahl bzw. die Lebensdauer ist vielmehr als eine Zufallsvariable aufzufassen, die einer gewissen Streuung unterliegt [BUX-86, JOA-82], d.h. gleiche Bauteile können bei gleichen Belastungskollektiven unterschiedliche Lebensdauern haben. Die Übertragung der Ergebnisse aus Lebensdauerversuchen einer kleinen Anzahl von gleichen Bauteilen bietet nicht die Gewähr, dass alle gleichartigen Bauteile bei gleicher Beanspruchung das gleiche Ausfallverhalten aufweisen. Die zur Nutzungsdauer auftretenden Belastungskollektive sind oft unbekannt, so dass sie zuvor in Lebensdauerversuchen gar nicht oder nur unzureichend simuliert werden können. Das Ausfallverhalten funktionskritischer oder risikoreicher Bauteile ist ebenfalls oft unzureichend bekannt. Zudem werden Ausfalldaten während der Entwicklung, bei der Prototypenerprobung und beim Kunden ungenügend aufgezeichnet, ausgewertet und in zuverlässigkeitsorientierten Datenbanken zusammengefasst [BER-99]. Aufgrund dieser Erkenntnisse wird ersichtlich, dass eine bauteilbegleitende Erfassung von Belastungskollektiv und Abnutzung sowie Verarbeitung dieser Informationen zum Produktlebenslauf mit Hilfe einer LCU eine bessere Prognose des Ausfallverhaltens bieten kann.

Das statistisch verteilte Ausfallverhalten von Bauteilen, Komponenten und Systemen ergibt sich durch die Schwankung von Belastung  $\sigma_B$  und Widerstandsfähigkeit  $\sigma_W$  des Werkstoffs und wird durch Interferenz-Modelle beschrieben [OCO-84]. Beide Größen schwanken in einem gewissen Bereich und müssen deshalb als Zufallsvariablen betrachtet werden. Wird die Belastung größer als die Widerstandsfähigkeit, so kommt es im Übergangsbereich der beiden Verteilungen zu Ausfällen (Bild 18).



**Bild 18:** Streuung und Wechselwirkung von Widerstandsfähigkeit  $\sigma_W$  und Belastung  $\sigma_B$  [OCO-90]

Für ein Bauteil ergeben sich für  $\sigma_B$  und  $\sigma_W$  ganz bestimmte Werte, so dass einfach über die Ausfallwahrscheinlichkeit entschieden werden kann. Wird das Bauteil jedoch vielfach hergestellt und in ein Produkt integriert, so differieren beide Größen  $\sigma_B$  und  $\sigma_W$  entsprechend Bild 18. Bei dynamischer Belastung tritt zusätzlich noch eine zeitliche Veränderung der Beanspruchung des Bauteils und Widerstandsfähigkeit ein, da bekannt ist, dass die Widerstandsfähigkeit mit zunehmender Lebensdauer entsprechend dem Verlauf der Wöhlerlinie abnimmt [BER-99]. Die bauteil- oder komponentenbegleitende Überwachung von Belastung und Widerstandsfähigkeit mittels einer LCU böte eine gangbare Möglichkeit, den Schwankungen beider Größen und damit dem nicht planbaren Ausfallverhalten zu begegnen.

Durch Bestimmung des Zustands von Bauteilen und Komponenten können Rückschlüsse auf ihre Zuverlässigkeit und die des Produktes gezogen werden. Der Zustand kann bestimmt werden durch Erfassung von Größen, die auf den Zustand einwirken und durch Erfassung von Größen, die durch den Zustand bedingt sind. Die erste Möglichkeit wird durch ein belastungsabhängiges Lebensdauermodell, die zweite durch ein zustandsabhängiges Symptommodell beschrieben. Ein Zuverlässigkeitsmodell von Bauteilen, Komponenten und Produkten kann ein Lebensdauer- oder Symptommodell oder eine Kombination von beiden sein. Lebensdauermodelle beschreiben die durchschnittliche Lebensdauer eines Bauteils oder einer Komponente in Abhängigkeit der auf sie einwirkenden Beanspruchung. Symptommodelle erlauben Rückschlüsse auf die Lebensdauer aufgrund einer sich in Symptomen äußernden Zustandsänderung. So kann bei der Komponente Wälzlager aus Drehzahl und Kraft mit Hilfe eines Lebensdauermodells sowohl in der Entwicklungsphase als auch zur Nutzungszeit die durchschnittliche Lebensdauer bestimmt werden. Mit Hilfe eines Symptommodells kann die Lebensdauer erst in der Nutzungszeit bestimmt werden. Hierzu muss eine sich in Symptomen äußernde Zustandsänderung des Wälzlagers

eintreten wie zum Beispiel ein Lagerschaden. Der Lagerschaden kann z.B. durch die Symptome Erhöhung der Lagertemperatur, Verringerung der Drehzahl und Erhöhung des Schalldruckpegels sowie Änderung des Frequenzspektrums mit Hilfe von Sensoren erfasst werden. Während ein Lebensdauermodell vom Lebensdauerbeginn an Werte für eine Ausfallwahrscheinlichkeit liefert, ist eine Prognose des Ausfalls mit Symptommodellen erst nach erstmaligem Auftreten eines zustandsabhängigen Symptoms möglich. Durch Kombination beider Modelle können Fehlinterpretationen des Lebensdauermodells zu einem frühen Zeitpunkt der Lebensdauer mit geringer Ausfallwahrscheinlichkeit vermieden werden, da das Symptommodell die statistische Unsicherheit des Lebensdauermodells umgeht [TÖN-97]. Durch Verknüpfung von durch die LCU bereitgestellten Produktlebenslaufdaten mit einem in der LCU gespeicherten Zuverlässigkeitsmodell könnte mit Hilfe der LCU auf das Ausfallverhalten und seine Ursachen geschlossen werden.

Wird die LCU produktbegleitend eingesetzt, so können sich Synergien für die LCU und für die Zuverlässigkeitsmodelle ergeben: Durch Vergleich des gespeicherten Zuverlässigkeitsmodells mit dem bereitgestellten Produktzustand kann die Prognose des Ausfallverhaltens des Produktes verbessert werden. Andererseits kann das Zuverlässigkeitsmodell durch stetige Evaluierung mit dem aktuellen Produktzustand validiert, verändert oder gar durch ein neues ersetzt werden (Kapitel 4.2).

### **2.3.2 Empirische Methoden**

Der Gütermarkt ist aufgrund seiner immensen Produkt- und Variantenvielfalt immer schwieriger zu überschauen. Verschiedene Methoden ermöglichen es heute dem Hersteller, Aussagen über das Verhalten seiner Produkte in der Nutzungsphase zu erhalten: Mit Hilfe der drei Instrumente der Marktforschung Befragung, Beobachtung und Experiment kann das Produktverhalten im Einsatz untersucht werden. Insbesondere durch systematisches Erfassen und Auswerten der im Rahmen der Servicemaßnahmen entstehenden Rückmeldungen lassen sich wertvolle Informationen über die Produktnutzung gewinnen. Auch mit Mitteln der Serienerprobung wird die Überlebenswahrscheinlichkeit vollständiger, verkaufsfertiger Produkte durch Simulation einzelner oder mehrerer Belastungen oder Feldversuche ermittelt. Mit Hilfe der Felddatenerfassung und -verarbeitung wird der Hersteller in die Lage versetzt, das Verhalten seiner Produkte in der Nutzungsphase zu erkennen. Oft werden erst hier Fehler und Schwachstellen am Produkt entdeckt. Verbesserungsmaßnahmen in der laufenden Produktion können daraufhin eingeleitet und ihre Wirksamkeit bewertet werden. Durch die Abschätzung des zukünftigen Ausfallverhaltens können die Konsequenzen für den Hersteller abgeleitet und vermindert werden, um z.B. Garantiekosten gering zu halten [PFE-01].

Auf Basis einer kurzen Beschreibung der empirischen Methoden zur Bereitstellung von Abnutzungsinformationen wird dargestellt, dass einige Methoden ganz oder teilweise durch den Einsatz einer LCU ersetzt werden können.

### **2.3.2.1 Serienerprobung**

Die Serienerprobung stellt in der Regel eine Prüfung auf Überlebenswahrscheinlichkeit vollständiger, verkaufsfertiger Produkte dar. Diese zerstörende Art der Prüfung ist mit hohen Kosten und einem beträchtlichen Zeitaufwand verbunden. Die drei Methoden der Serienerprobung sind Simulation einzelner Beanspruchungen, Umweltsimulation und Feldversuch.

Bei der Simulation einzelner Beanspruchungen werden durch gezielte Belastung die erwarteten Einsatzbedingungen des Produktes simuliert. Hierbei wird eine Vielzahl von Belastungen ausgeschlossen, um die Komplexität der Simulation zu verringern. Die tatsächlich bei der Nutzung auftretenden Beanspruchungen ergeben sich allerdings aus einem weitaus komplexeren Geflecht von Belastungen. Im Gegensatz zur Simulation einzelner Beanspruchungen wird in der Umweltsimulation eine größere Anzahl von Belastungen kombiniert. Um Ausfälle durch Belastungen so zu simulieren, wie sie im Gebrauch auftreten, bedarf es Zuverlässigkeitsmodelle. Die Simulation bietet Zeitvorteile gegenüber der Serienerprobung. Die der Realität am meisten entsprechenden Einsatzbedingungen während der Serienerprobung können durch Feldversuche im tatsächlichen Nutzungsumfeld des Produktes erzielt werden. Ziel ist es, Konstruktions- und Fertigungsfehler bereits in der laufenden Serie zu beseitigen. Kosten- und Zeitaufwand für derartige Feldversuche liegen im Vergleich zu den zuvor genannten Simulationen weitaus höher, so dass nur wenige Prüfobjekte untersucht werden. Obgleich in dieser Phase der Serienerprobung repräsentative Einsatzbedingungen vorherrschen, umfassen sie nur einen Bruchteil der faktisch möglichen Bedingungen während der Nutzungsphase des Produktes. Feldversuche sind notwendig, da Informationen über das Verhalten von Produkten viel zu spät das Unternehmen erreichen würden, wenn sie erst in der Nutzungsphase z.B. durch Experimente gewonnen werden.

Die Stärken der Serienerprobung liegen in der umfassend möglichen Ursachenanalyse von Mängeln. Aufgrund der bekannten Anzahl der Versuchsobjekte kann eine erwartete Zuverlässigkeit des Produktes berechnet werden. Allerdings gelten die ermittelten Werte nur für die Stichprobe. Weitere Schwächen sind die nur in begrenztem Maße mögliche Abdeckung der denkbaren Nutzungsmodalitäten und der vergleichsweise hohe Kosten- sowie Zeitaufwand. Letzterer kann die Markteinführung verzögern. Auch durch den Einsatz einer LCU kann auf die Serienerprobung nicht verzichtet werden, da sie vor einer Massenproduktion konstruktions- und fertigungsbedingte Fehler aufdecken soll. Jedoch kann die Planung aller drei Maßnahmen der

Serienerprobung durch mit Hilfe der LCU bereitgestellte Produktlebensläufe des Vorgängermodells verbessert werden.

### **2.3.2.2 Marktforschung**

Mit dem Ablauf der Garantiezeit bricht die Verbindung zwischen Hersteller und Kunde häufig völlig ab. Da die Kosten der Mängelbeseitigung nun vom Kunden allein getragen werden, hat dieser ein verringertes Interesse, sich bei der Instandsetzung des Produktes an den Hersteller oder an die von diesem lizenzierten Werkstätten zu wenden. Der Hersteller hat die Möglichkeit durch die Methoden Befragung, Beobachtung und Experiment Daten aus der Produktnutzung zu erheben. Die Befragung dient der Ermittlung des Ausfallverhaltens. Bei der Beobachtung werden Verhalten und Reaktion von technischen Geräten und Personen erfasst und analysiert. Die so erhobenen Daten eignen sich weniger zur Erfassung des Ausfallverhaltens in der Produktnutzungsphase. Ziel ist es, die Gebrauchstauglichkeit von Produkten, d.h. die Eignung eines Gutes für einen bestimmten Verwendungszweck, die auf objektiv und nicht objektiv feststellbaren Gebrauchseigenschaften beruht und deren Beurteilung sich aus individuellen Bedürfnissen ableitet, zu bewerten. In einem Experiment wird ein Abhängigkeitsverhältnis oder ein Ablauf unter vorher festgelegten Bedingungen untersucht. Der Nutzer kennt seine Funktion als Testperson. Ziel von Experimenten ist die Erfassung der Wirkung auf den Nutzer.

Mit Hilfe der Befragung wird ein Überblick nur über diejenigen Produkte gewonnen, die in eine Werkstatt gebracht werden. Ferner werden nicht ausgefallene Produkte nicht erfasst. Die Schwäche der Beobachtung ist, dass Gerätereaktionen und Nutzerverhalten nur subjektiv erfasst werden. Nicht erfasste Gerätereaktionen und nicht beobachtetes Nutzerverhalten bleiben ohne Konsequenzen im Hinblick auf Produktverbesserungen. Insbesondere die Befragung kann durch eine Bereitstellung von Produktlebenslaufdaten mit Hilfe der LCU ersetzt werden. Prinzipiell könnten auch Beobachtung und Experiment durch Bereitstellung von Informationen über das Nutzerverhalten ersetzt werden, jedoch bietet die Bewertung der Gebrauchstauglichkeit durch den Nutzer eine verbesserte Erfassung der Wirkung auf ihn. Somit kann die LCU die objektive Datenbasis für die subjektive Bewertung des Nutzers bei Beobachtung und Experiment liefern.

### **2.3.2.3 Felddatenerfassung und -verarbeitung**

Innerhalb der Nutzungszeit eines Produktes stehen dem Hersteller mehrere Instrumente zur Datenerhebung bezüglich Qualität und Zuverlässigkeit des Erzeugnisses zur Auswahl. Die Aussagefähigkeit erhobener Produktdaten kann mit zunehmender zeitlicher und räumlicher Entfernung vom Zeitpunkt und Ort der Markteinbringung des Produktes abnehmen. Die entscheidenden Wendepunkte hierbei sind das Ende

der Garantiezeit und der Wechsel des Nutzers. Garantie- und Kulanzstatistiken sowie die Auswertung von Veröffentlichungen liefern regelmäßig wichtige Zuverlässigkeitsdaten.

Vor Ablauf der Garantiezeit können bestimmte Felddaten nahezu vollständig erfasst werden. Hierzu gehören insbesondere zum Vorschein tretende Produktmängel, deren Behebung durch den Garantievertrag abgedeckt werden. Heutige Instrumentarien ermöglichen es dem Hersteller kaum, Mängel ohne Tätigwerden des Kunden festzustellen. Ausnahmen bilden gesetzlich oder vertraglich vorgeschriebene Instandhaltungsmaßnahmen z.B. beim Automobil oder bei Leasingobjekten.

Die durch Kundenbeanstandungen während der Garantiezeit gewonnenen Daten bilden die Grundlage zur Ermittlung der Zuverlässigkeit des Produktes. Daten aus dem Feld zeichnen sich dadurch aus, dass sie gegenüber Daten aus dem Versuch die tatsächlichen Gegebenheiten und Beanspruchungen der Nutzung wiedergeben, aber nicht in jedem Fall vollständig erfassbar sind [VDA-84]. Es muss beachtet werden, dass Felddaten zwar Auskünfte über die Zuverlässigkeit geben, aber im Allgemeinen nicht auf die Fehlerursache hinweisen.

Die Stärken der Auswertung von Feldausfällen während der Garantiezeit liegen in der recht präzisen Ermittlung der tatsächlichen Zuverlässigkeit von Produkten während dieser Garantiezeit. Schwächen ergeben sich aus der ungenügenden Erfassung von Feldausfällen nach Ablauf der Garantiezeit, aus der sich nicht immer im befriedigenden Maße durchführbaren detaillierten Fehlerbestimmung und der fast gänzlich ausgeschlossenen Ursachenanalyse.

Mit Hilfe einer LCU können Produktdaten aus dem Feld in der Nutzungsphase bereitgestellt werden. Hierdurch werden während und nach Ablauf der Garantiezeit sowie über Nutzerwechsel hinweg objektive Daten bereitgestellt, mit denen Aussagen über Ausfall- und Nutzerverhalten getroffen werden können.

## 2.4 Sensoren

Die LCU erfasst Informationen über physische Veränderungen mit Hilfe von Sensoren. Ein Sensor ist ein Wandler, der eine nichtelektrische biologische, chemische, magnetische, mechanische oder in Form von Strahlungsenergie auftretende Messgröße in eine elektrische Messgröße umwandelt.

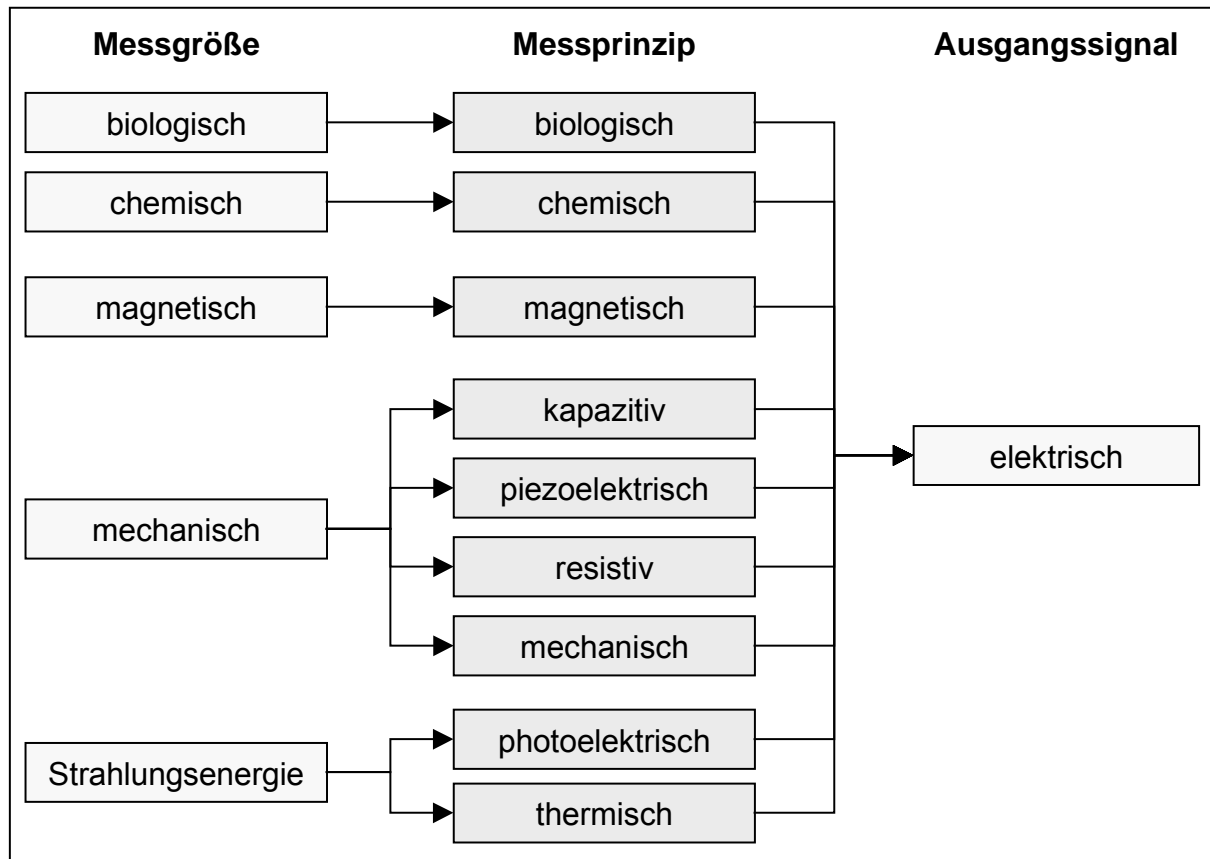
In der Literatur gibt es keine einheitliche Definition eines Sensors. Jedoch lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Baueinheit *Sensor* aus dem Elementarsensor (Messfühler) und einer ersten elektronischen Signalaufbereitung besteht. Vom *intelligenten Sensor* (auch: *smart sensor*) spricht man, wenn die Signalaufbereitung zusätzlich noch eine Signalverknüpfung und/oder Analog-Digital-Wandlung vornimmt. Unter einem *Sensorsystem* wird die Verbindung eines oder mehrerer Sensoren mit

einem Rechner über einen Kommunikationskanal verstanden [SCH-92a, KLE-98, DAM-98, ADA-97].

Sensoren können nach den Messgrößen in biologische, chemische und physikalische Sensoren gegliedert werden. Biosensoren und chemische Sensoren haben zurzeit in Forschung und Entwicklung in Bezug auf Miniaturisierung und Integration auf Halbleitern einen vergleichbaren Stand zu den bereits breit angewendeten integrierten auf Technologien der Mikroelektronik basierenden physikalischen Sensoren erreicht. Eine Integration von Sensorelementen und elektronischer Messwertverarbeitung zu einem Biochip sowie Chemochip wird für die Zukunft angestrebt. Die Entwicklung von biologischen und chemischen Sensoren mit den Mitteln der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik wird die Möglichkeit bieten, mit vielen in einem Gehäuse vereinten Sensorelementen, mehrere biologische bzw. chemische Größen zu erfassen. Im Gegensatz dazu können physikalische Sensoren bis auf wenige Ausnahmen wie einem Kraft-Momenten-Sensor nur eine Größe pro Sensor messen.

Bedenkt man, dass heutige Biosensoren ohne Kühlung nur eine Lebensdauer von ca. sechs Wochen ab dem ersten Messvorgang haben [SCH-96a, REN-96], so wird ersichtlich, dass sie nur für Produkte mit kurzen Nutzungsdauern in Frage kommen. Um einen Überblick über die Sensoren zu ermöglichen, wurden sie nach dem Messprinzip klassifiziert. Dabei orientieren sich die identifizierten neun Kategorien an den durch die Entwicklung des Sensormarktes geschaffenen Marktverhältnissen.

Bei der elektrischen Messtechnik werden die Größen elektrische Spannung, Strom, komplexer Widerstand, elektrische Leistung, elektrische Energie, Phasenwinkel und Frequenz gemessen. Diese Messungen können mit Hilfe des LCB der LCU sowie elektrischer Messmittel wie Widerständen, Kondensatoren und Spulen ausgeführt werden, so dass keine Sensoren wie bei der nichtelektrischen Messtechnik benötigt werden. Die elektrische Messtechnik kann bei stromdurchflossenen oder mit elektrischer Spannung beauftragten Komponenten angewendet werden. Solche Module sind beispielsweise Elektromotoren. Nicht alle Produkte weisen aber diese Module auf, so dass in diesem Fall zur Erfassung physischer Veränderungen die nichtelektrische Messtechnik herangezogen werden muss.

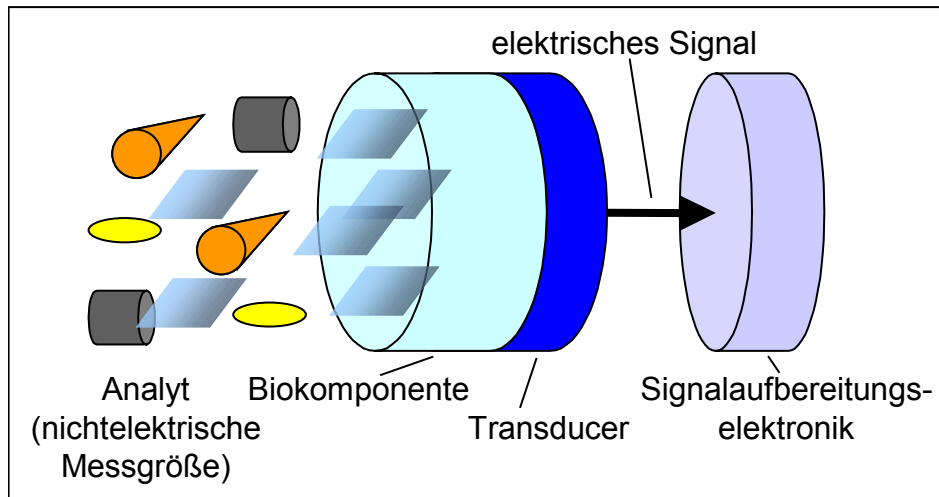


**Bild 19:** Klassifizierung der Sensoren nach dem Messprinzip

#### 2.4.1 Biologische Sensoren

Mit Hilfe von biologischen Sensoren (Biosensoren) werden Informationen über Art und Anzahl von (Mikro-) Organismen erfasst. Hierzu wird die Art und Konzentration von Analyten gemessen. Der Biosensor bestimmt auf Basis der Wechselwirkung mit dem Analyten die chemische Struktur der Moleküle. Ein Biosensor besteht aus den zwei im direkten Kontakt stehenden Komponenten Biokomponente und Transducer [TAY-96]. Die eingesetzten biologischen Systeme (Biokomponenten) sind von unterschiedlicher Struktur. Sie reichen vom Einsatz einzelner Biokomponenten wie Enzymen oder Antikörpern über die Kombination von Biokomponenten bis zu hoch integrierten biologischen Systemen wie Gewebeschnitten oder Mikroorganismen (high integrated biological system). Das biologische System wird mit sog. Transducern kombiniert, deren Aufgabe es ist, die Wechselwirkung der Biokomponente mit dem Analyten in ein elektrisch auswertbares Signal umzuwandeln, das durch eine Auswertelektronik verarbeitet werden kann. Bild 20 zeigt die Baueinheit Biosensor.



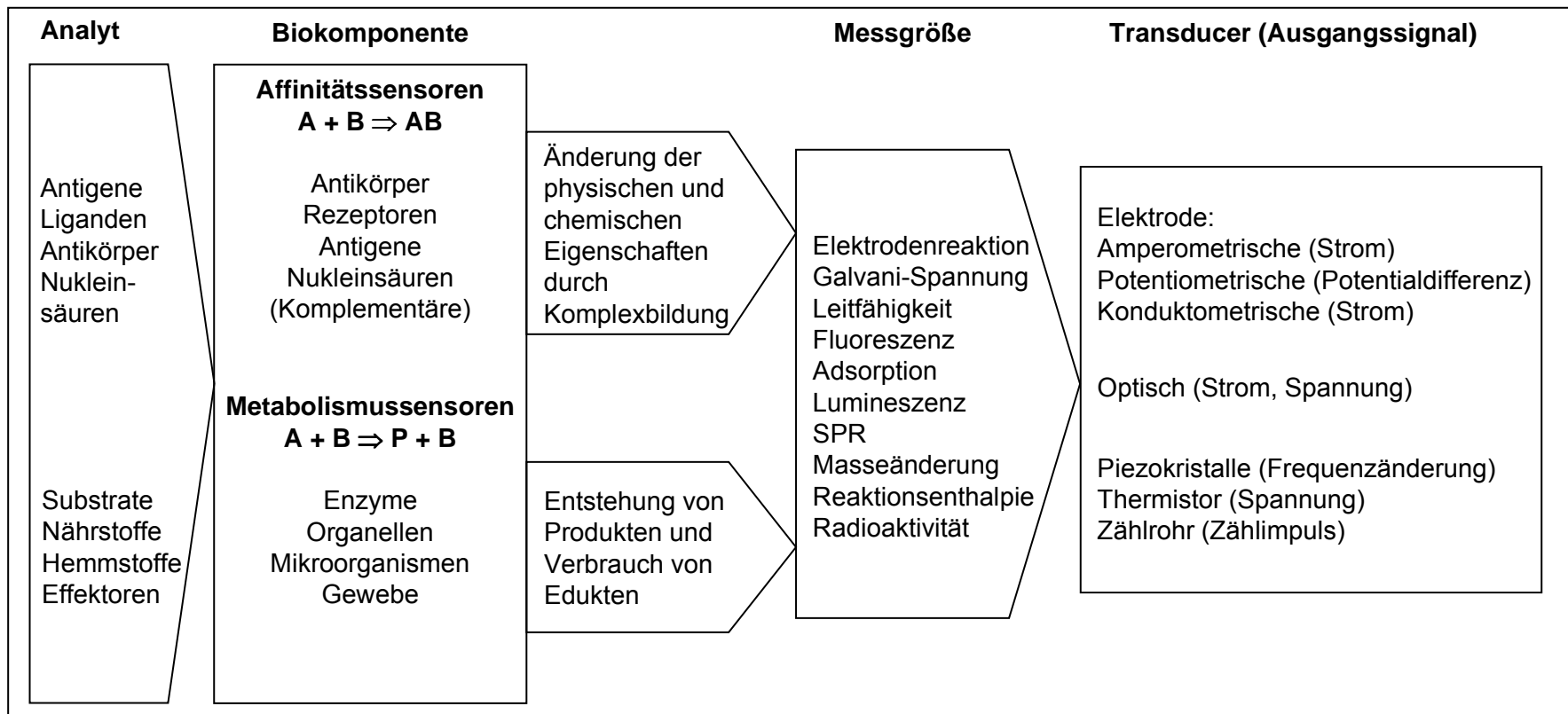


**Bild 20:** Baueinheit Biosensor mit Einzelementen nach [SCH-89]

Nach dem Messprinzip unterteilt man die Transducer in die oft verwendeten elektrochemischen und optischen Transducer sowie in die seltener angewendeten piezoelektrischen und thermometrischen Transducer. In Bild 21 ist die Einteilung biologischer Sensoren dargestellt. Affinitätssensoren funktionieren mit selektiver Schlüssel-Schloss-Molekülkonfiguration; Metabolismussensoren weisen Reaktionsprodukte nach. Substrate sind Stoffe, die von Enzymen umgesetzt werden („A“ in Bild 21) wobei ein oder mehrere Produkte („P“) gebildet werden. Für Biosensoren sind niedermolekulare Substrate wie z.B. Glucose, Laktat und Ethanol interessant. Nährstoffe werden von Organellen und Mikroorganismen zur Energiegewinnung und zum Aufbau von Zellen verwertet. Im Biosensor für den biologischen Sauerstoffbedarf sind z.B. Mikroorganismen vor einer Elektrode angeordnet, wodurch die Anwesenheit solcher Nährstoffe nachgewiesen werden kann. Hemmstoffe üben einen negativen Effekt auf den Metabolismus eines Organismus, z.B. eines Mikroorganismus, aus. Es kann z.B. ein Schwermetall oder ein Pestizid bestimmt werden, indem der Effekt auf einen Mikroorganismus oder auf Chloroplasten (Organelle zur Photosynthese) gemessen wird. Effektoren sind Stoffe, die zu Veränderungen physiologischer Größen in Zellen oder Geweben führen; diese können positiv (z.B. starkes Wachstum) oder negativ (z.B. Stoffwechsel ist behindert) sein.

Bild 21:

Einteilung biologischer Sensoren nach [SCH-89, SCH-92b, HAL-95]

**Legende:**

SPR: Surface Plasmon Resonance

A: Analyt Typ A

B: Analyt Typ B

P: Reaktionsprodukt

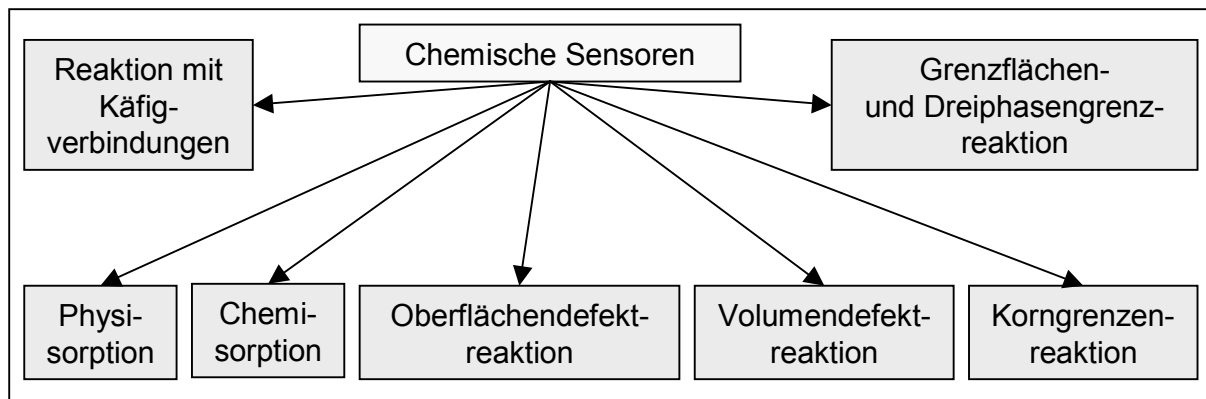
Da verfügbare biologische Sensoren nur für Produkte mit kurzer Nutzungsdauer von maximal sechs Wochen verwendet werden können [LEM-02, MEN-97], kann eine LCU mit Hilfe von Biosensoren z.B. die Keimfreiheit chirurgischer Instrumente oder medizinischer Produkte wie Blutkonserven und steril zu verabreichende Medikamente überwachen. Werden in Zukunft Biosensoren als Biochips integriert ohne Bio-komponenten nur auf elektrischen Messprinzipien basieren, entfällt die kurze Lebensdauer, so dass Biochips auch bei langlebigen Produkten eingesetzt werden können.

#### **2.4.2 Chemische Sensoren**

Chemische Sensoren erfassen die Konzentration oder Aktivität von Atomen, Molekülen oder Ionen in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern. Die Stoffe werden entweder selektiv oder summarisch erfasst [SCH-92b]. In Bild 22 sind die chemischen Sensoren klassifiziert nach den Wechselwirkungsprozessen zwischen Stoff und Sensor dargestellt. Wichtige Vertreter chemischer Sensoren sind Pellistoren, elektrochemische Sensoren, Feststoffelektrolytsensoren, Metalloxidsensoren und CHEM-FETs (Chemically Sensitive Field Effect Transistor). Pellistoren weisen Stoffe durch Messung der Reaktionstemperatur des Katalysators nach, der zur Beschleunigung der Reaktion des Stoffes verwendet wird. Sie werden bevorzugt zum Nachweis reduzierender Gase wie Kohlenmonoxid oder Methan eingesetzt. Elektrochemische Sensoren arbeiten nach dem Prinzip der Grenzflächenreaktion. Durch Verschiebung von chemischen Potentialen wird die Ladung von Dipolschichten, welche an der Grenzfläche zwischen einem elektrochemisch aktivem Material (Membrane, Festkörper u.a.) und dem nachzuweisenden Elektrolyten erzeugt werden, verändert. Ein bekanntes Beispiel ist ein pH-Wert-Sensor. Feststoffelektrolytsensoren sind oft selektiver als Sensoren mit Flüssigelektrolyten und erlauben den Aufbau mechanisch robuster Sensoren. Wichtiger Vertreter dieser Klasse ist die Lambda-Sonde, die zur Abgaskontrolle von Verbrennungsmotoren eingesetzt wird. Metalloxidsensoren arbeiten mit Oberflächendefekt- und bei Temperaturen oberhalb 500°C mit Volumendefektreaktionen. Der nachzuweisende Stoff beeinflusst die Oberflächendichte beweglicher Ladungsträger von halbleitenden Metalloxiden, so dass er spezifisch durch Widerstandsmessung erfasst wird. Durch Integration von mit Oberflächeneffekten arbeitenden chemischen Sensoren in einen MOS-FET (Metalloxid-Feldeffekttransistor) oder Schottkydioden wird die Empfindlichkeit der Sensoren gesteigert. Diese als CHEMFET bekannten chemischen Sensoren werden in ISFET (Ion Sensitive FET) und GASFET (Gas Sensitive FET) unterteilt.

Mit Hilfe von chemischen Sensoren können chemisch aggressive Umgebungen wie die Prozesschemie oder Gefahrguttransporte überwacht werden. Es können auch Messprinzipien chemischer Sensoren zur Messung physikalischer Messgrößen an-

gewendet werden. Als Beispiel kann eine LCU die Feuchte einer Metallstruktur als Folge von Alterung messen (Kapitel 2.1.1.1). Hierbei heizt ein Peltier-Element ein Gas bis zum Taupunkt auf. Die Taupunkttemperatur ist Maß für die Feuchte.



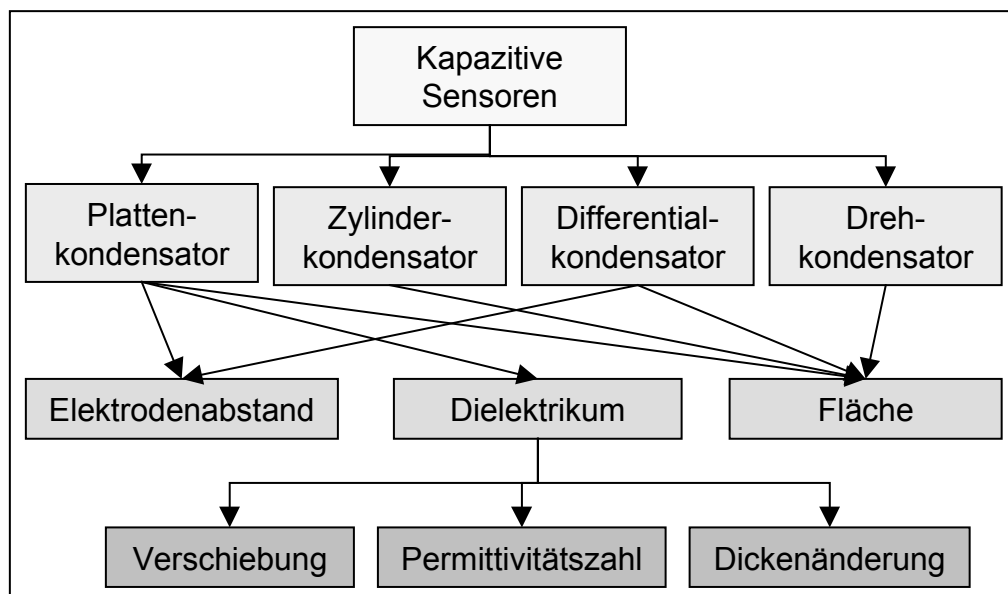
**Bild 22:** Einteilung chemischer Sensoren

## 2.4.3 Physikalische Sensoren

Physikalische Sensoren erfassen Informationen über Art und Größe magnetischer, mechanischer und strahlenenergetischer Größen.

### 2.4.3.1 Kapazitive Sensoren

Die zu erfassende nichtelektrische Größe wird in eine durch Änderung von Fläche und Abstand der Elektroden oder des Dielektrikums bedingte Kapazitätsänderung transformiert. In Bild 23 wird ein Überblick über kapazitive Sensoren gegeben.



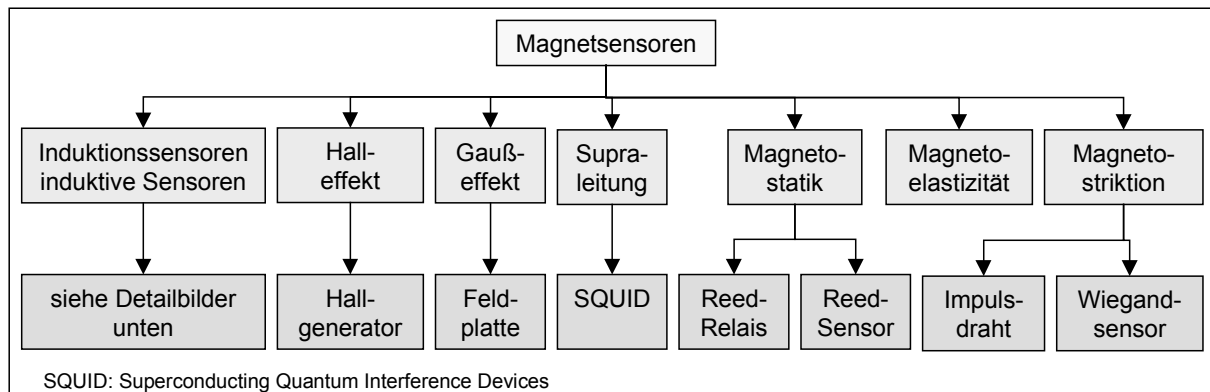
**Bild 23:** Klassifizierung kapazitiver Sensoren

Bezogen auf die Beispiele aus Kapitel 2.1.1 könnten mit kapazitiven Sensoren die Messung der Feuchte der Metallstruktur als Folge von Alterung, die Messung der abfallenden Vorspannkraft der Schraube in der Brennkammer als Folge von Ermü-

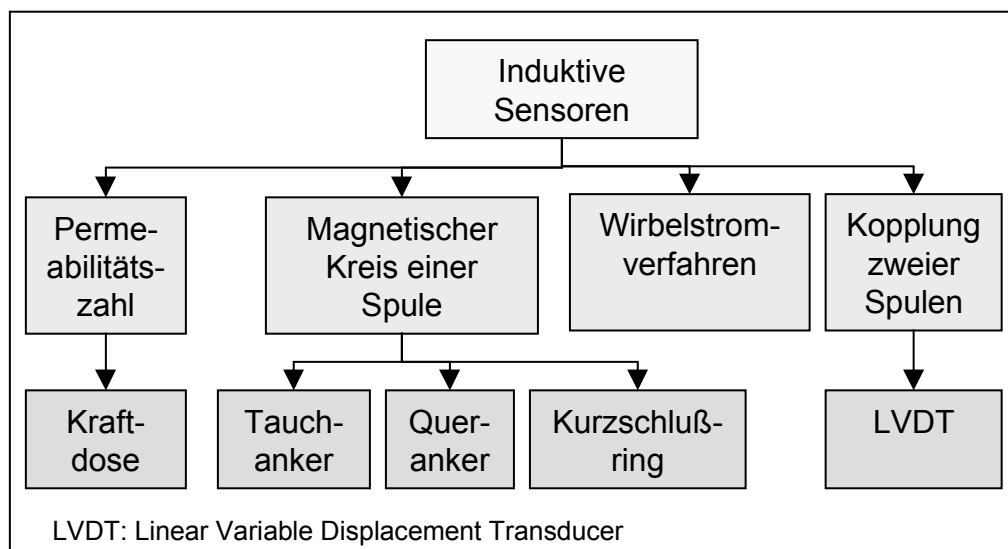
ung oder Kriechen und über eine Körperschallmessung der schlechte Eingriff der Verzahnung als Folge von Verschiebung genannt werden.

### 2.4.3.2 Magnetische Sensoren

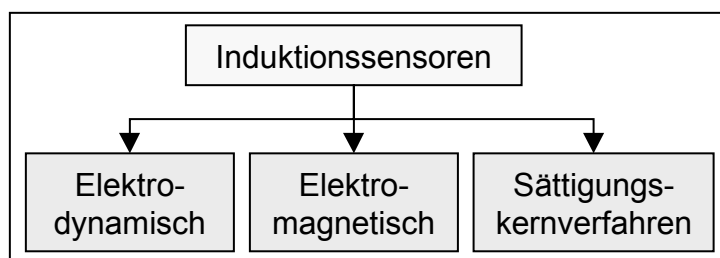
Magnetsensoren messen Änderungen der magnetischen Größen wie Feldstärke und Flussdichte oder die Auswirkungen magnetischer Größen auf ihre Umgebung. Beispiele für die erste Art sind Induktivitätssensoren, für die zweite Hallgeneratoren. In den folgenden drei Bildern werden die magnetischen Sensoren klassifiziert.



**Bild 24:** Klassifizierung von Magnetsensoren



**Bild 25:** Klassifizierung induktiver Sensoren



**Bild 26:** Klassifizierung von Induktionssensoren

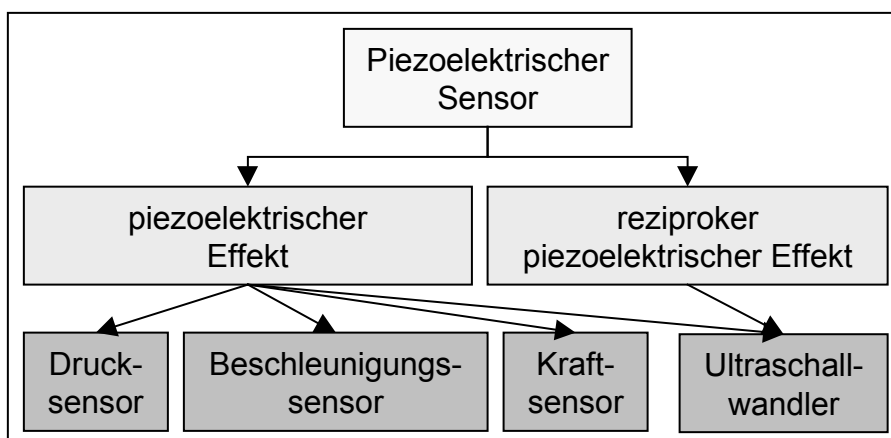
Bezogen auf die Beispiele aus Kapitel 2.1.1 könnten mit magnetischen Sensoren die Messung des abfallenden Öldrucks der Motorschmierung als Folge von Verschleiß und die Messung der abfallenden Vorspannkraft einer gelockerten Schraube als Folge von Kriechen genannt werden.

### 2.4.3.3 Mechanische Sensoren

Mechanische Sensoren erfassen die Eigenschaften eines Messobjektes über die Änderung verschiedener mechanischer Messgrößen. Die anderen physikalischen Sensorklassen erfassen Eigenschaften von Messobjekten über die Änderung einer einzigen Messgröße: Beispielsweise erfassen piezoelektrische Sensoren verschiedene Messgrößen immer über die Änderung piezoelektrischer Eigenschaften eines Kristalls oder resistive Sensoren immer über die Änderung des elektrischen Widerstandes. Die Messgrößen mechanischer Sensoren sind beispielsweise Masse, Wichte, Schwingfrequenz oder Federkraft. Aufgrund der Fülle möglicher Messgrößen können die mechanischen nicht wie die anderen Sensoren in einem zusammenfassenden Bild dargestellt werden. Ein Anwendungsbeispiel für mechanische Sensoren stellen ein Mikroschalter oder ein elektrisch leitender Draht als Sensor zur Überwachung einer nicht erlaubten Gehäuseöffnung während der Garantiezeit dar. Im Falle des Mikroschalters handelt es sich um Verformung, beim Draht um Bruch.

### 2.4.3.4 Piezoelektrische Sensoren

Werden bestimmte Kristalle durch Einwirken einer Kraft verformt, so treten an bestimmten Flächen dieser Kristalle elektrische Ladungen auf. Diese Erscheinung bezeichnet man als den piezoelektrischen Effekt. Er ist umkehrbar: Wird an bestimmten Flächen geeigneter Kristalle eine elektrische Spannung angelegt, so werden diese Kristalle deformiert. Diese Erscheinung bezeichnet man als den reziproken piezoelektrischen Effekt.



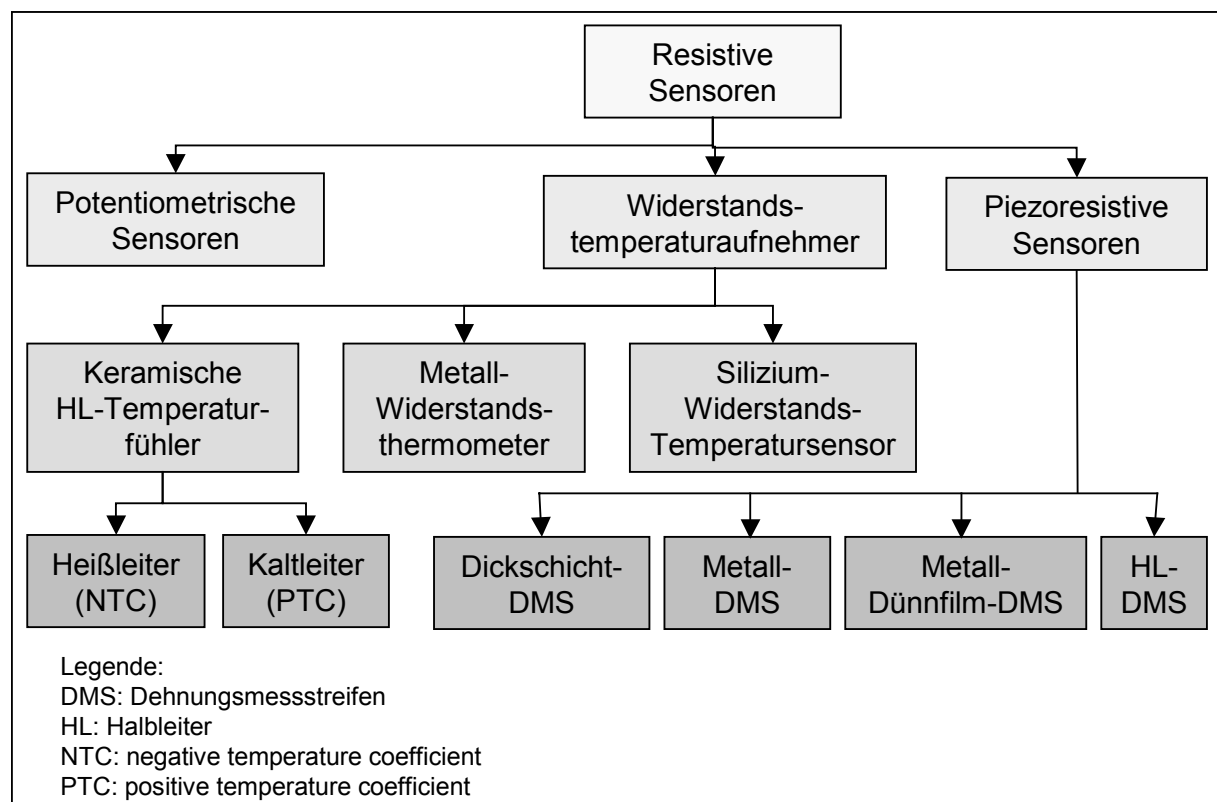
**Bild 27:** Klassifizierung piezoelektrischer Sensoren

Bezogen auf die Beispiele aus Kapitel 2.1.1 könnten mit piezoelektrischen Sensoren die Messung der Dehnung der Bolzen der Triebwerksbefestigung als Folge von Er-

müdung, die Messung der abfallenden Vorspannkraft einer gelockerten Schraube als Folge von Kriechen, die Messung des abfallenden Öldrucks der Motorschmierung als Folge von Verschleiß, eine Körperschallmessung zur Erfassung des schlechten Eingriffs der Verzahnung als Folge von Verschiebung und die Ultraschallmessung der Schäden an einer Schweißnaht als Folge von Alterung genannt werden.

#### 2.4.3.5 Resistive Sensoren

Die nichtelektrische Messgröße wirkt auf einen elektrischen Widerstand, dessen Wert sich in Abhängigkeit von der Messgröße ändert.



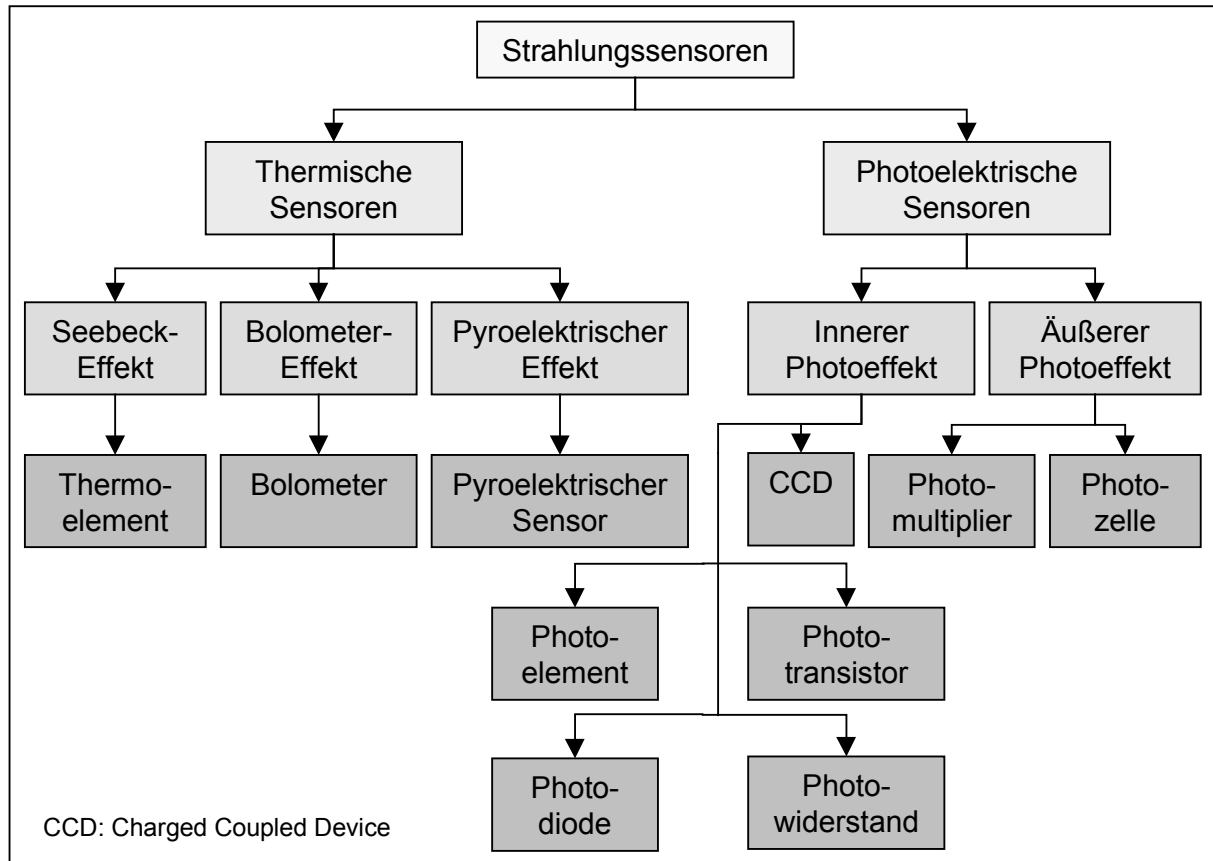
**Bild 28:** Klassifizierung resistiver Sensoren

Bezogen auf die Beispiele aus Kapitel 2.1.1 könnten mit resistiven Sensoren die Messung der Feuchte der Metallstruktur als Folge von Alterung, die Messung der Dehnung der Bolzen der Triebwerksbefestigung als Folge von Ermüdung und die Messung der steigenden Temperatur des Achslagers des Drehgestells als Folge von Verformung genannt werden.

#### 2.4.3.6 Strahlungssensoren

Strahlungssensoren messen elektromagnetische Strahlung. Bei der Absorption von Lichtquanten (Photonen) in einem Festkörper wird durch die aufgenommene Strahlungsenergie eine Anregung der Gitteratome oder eine Änderung der Energieverteilung der Elektronen in den Atomen bewirkt. Der erste Fall führt zu einer Temperatur-

erhöhung des Festkörpers, die meist indirekt durch eine Änderung seiner elektrischen Eigenschaften wie beispielsweise Widerstandserhöhung nachgewiesen werden kann, während im zweiten Fall eine Änderung der Ladungsträgerdichte eintritt, die durch eine in Anzahl und Energie veränderte Lichtquantenemission nachgewiesen werden kann. Entsprechend dieser beiden Effekte teilt man die Strahlungssensoren in thermische und photoelektrische Sensoren ein.



**Bild 29:** Klassifizierung von Strahlungssensoren

Bezogen auf die Beispiele aus Kapitel 2.1.1 könnten mit Strahlungssensoren die Messung der steigenden Temperatur des Achslagers des Drehgestells als Folge von Verformung und die optische Erfassung der Schäden an einer Schweißnaht als Folge von Alterung genannt werden.

## 2.5 Komponenten zur Verarbeitung, Speicherung und Übertragung

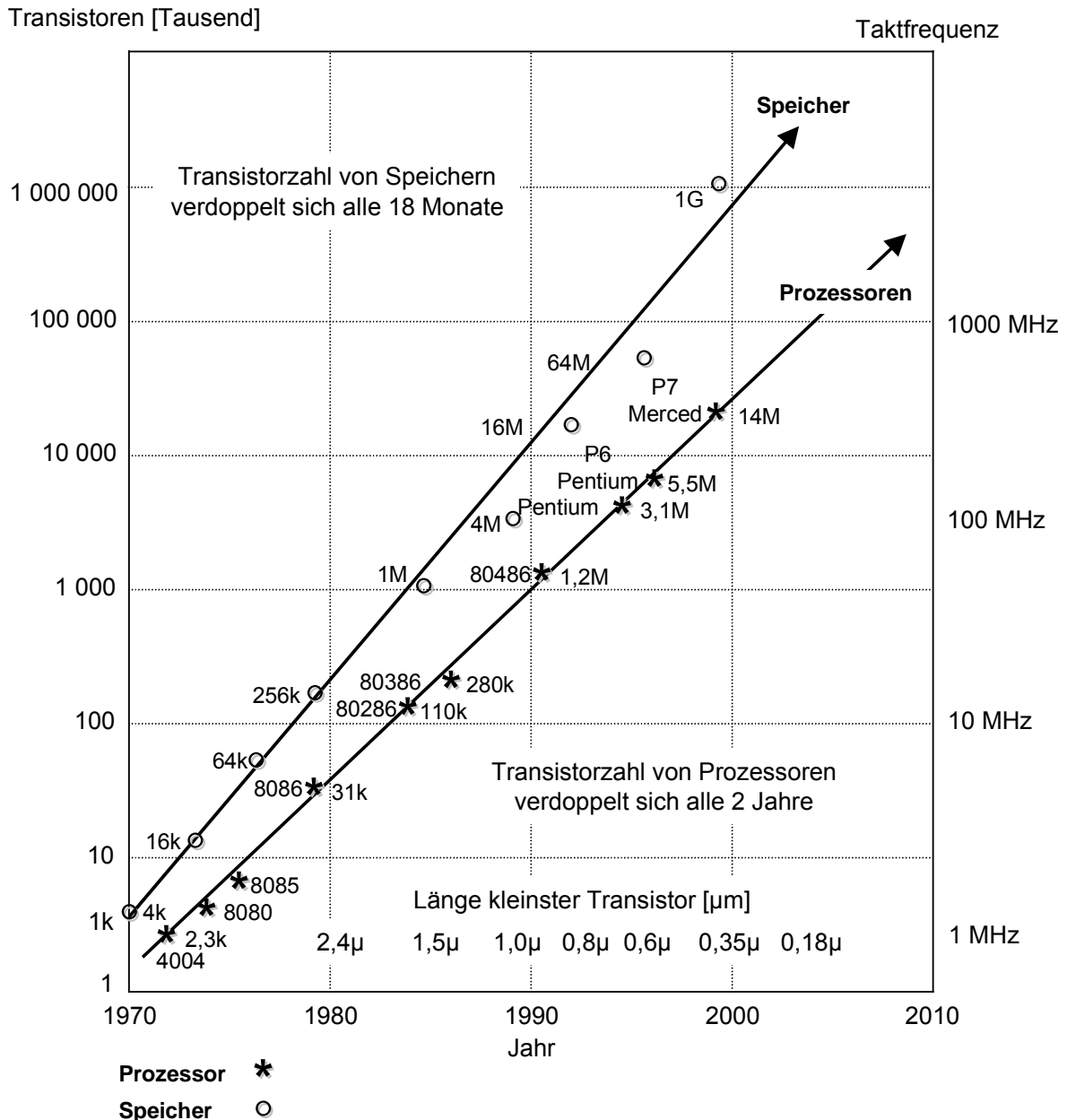
Die Anpassungsinformationen müssen durch die LCU verarbeitet, gespeichert und übertragen werden. Hierzu eignen sich aufgrund ihres Preis-/Leistungsverhältnisses insbesondere die elektronischen Komponenten Prozessor, Halbleiterspeicher und Interface, die zusammen als Mikrocontroller bezeichnet werden. Bei preiswerten, nicht komplexen Produkten, wie beispielsweise einer Mehrwegkamera bietet es sich an, zur Erleichterung ihrer Demontage Barcodemarkierungen als Speicher des Demontageplans zu verwenden, da deren Speicherkapazität in diesem Fall ausreichend



ist, so dass kein elektronischer, teurerer Speicher benötigt wird. Hat das Produkt große Abmaße, so könnte es aus Kostengründen von Vorteil sein, das Interface nicht drahtgebunden, sondern als Funkschnittstelle zwischen den Sensoren und Aktoren sowie dem Prozessor auszuführen. Produktbeispiele sind große Industrieanlagen wie Klärwerke oder petrochemische Anlagen mit weit verteilten Sensoren und Aktoren. In Anwendungsfällen mit großem Sicherheitsbedarf wird man dagegen auf ein drahtgebundenes Interface bestehen, um Störungen einer Funkschnittstelle durch elektromagnetische Einstreuungen zu begegnen. Ebenfalls abhängig von der Anwendung ist die geforderte Leistung der elektronischen Komponenten Halbleiterspeicher und Prozessor. Ein Produkt mit kurzer Nutzungsdauer wie eine Mehrwegkamera erfordert eine geringere Speicherkapazität zur Speicherung des Produktlebenslaufs als eines mit langer Nutzungsdauer wie z.B. ein Automobil. Ist die Erfassung der Anpassungsinformationen nicht zeitkritisch wie bei einem chipkartengestützten Zahlungsmittel (z.B.: electronic cash Karte, GeldKarte), so genügt ein langsamer Prozessor. Dagegen muss eine LCU zur Überwachung eines sicherheitsrelevanten Produktes wie beispielsweise eines Drehgestells über einen schnellen Prozessor verfügen, der die hochfrequenten Eingangssignale eines Beschleunigungssensors zur Erfassung der Kräfte bei einer Weichendurchfahrt zu erfassen vermag.

### 2.5.1 Prozessor und Mikrocontroller

Die Produktinformationen müssen für eine Speicherung, Übertragung und Umsetzung verarbeitet werden. Hierzu eignet sich ein mikroelektronischer Prozessor, der die zentrale, verarbeitende Einheit von Digitalrechnern ist [KRÜ-90]. Der Prozessor kann mit externen Speicher- und Schnittstellenbausteinen oder mit diesen als Mikrocontroller integriert verwendet werden. Das Preis-/Leistungsverhältnis von Mikrocontrollern wird durch die Transistoranzahl pro Fläche und die Stückkosten beschrieben. In Bild 30 ist die Entwicklung der Transistorzahl je Schaltkreis für Speicher-ICs und Mikroprozessoren der Firma Intel dargestellt. Man erkennt deutlich, dass das sog. Gesetz von Moore immer noch zutrifft. Gordon Moore, führender Mitarbeiter von Intel, prophezeite 1975, dass sich die Transistoranzahl pro Chip alle 18 Monate verdoppeln wird bzw. sich der Preis bei gleicher Leistungsfähigkeit halbiert. Ein Mikrocontroller kann entweder aus Standard-ICs oder aus speziell für eine Anwendung entwickelten ICs, sog. ASICs, aufgebaut sein. Der rasante Fortschritt von ASICs dokumentiert sich in einigen technologischen Kenngrößen: Die Feature Size  $\lambda$  ist ein Maß für die Länge des kleinsten MOS-Transistors, d.h. dass in einer 0,3  $\mu\text{m}$  Technologie die Länge des kleinsten Transistors 0,3  $\mu\text{m}$  beträgt. Mit abnehmender Feature Size wird der Flächenbedarf pro Transistor geringer und die Transistoreigenschaften verbessern sich. Je größer der in einem IC enthaltene Silizium-Chip, das sog. *Die*, und je kleiner  $\lambda$ , desto mehr Transistoren können in einem IC integriert werden.



**Bild 30:** Entwicklung der Transistorzahl je Schaltkreis für Speicher-ICs und Mikroprozessoren der Fa. Intel nach [GEP-98]

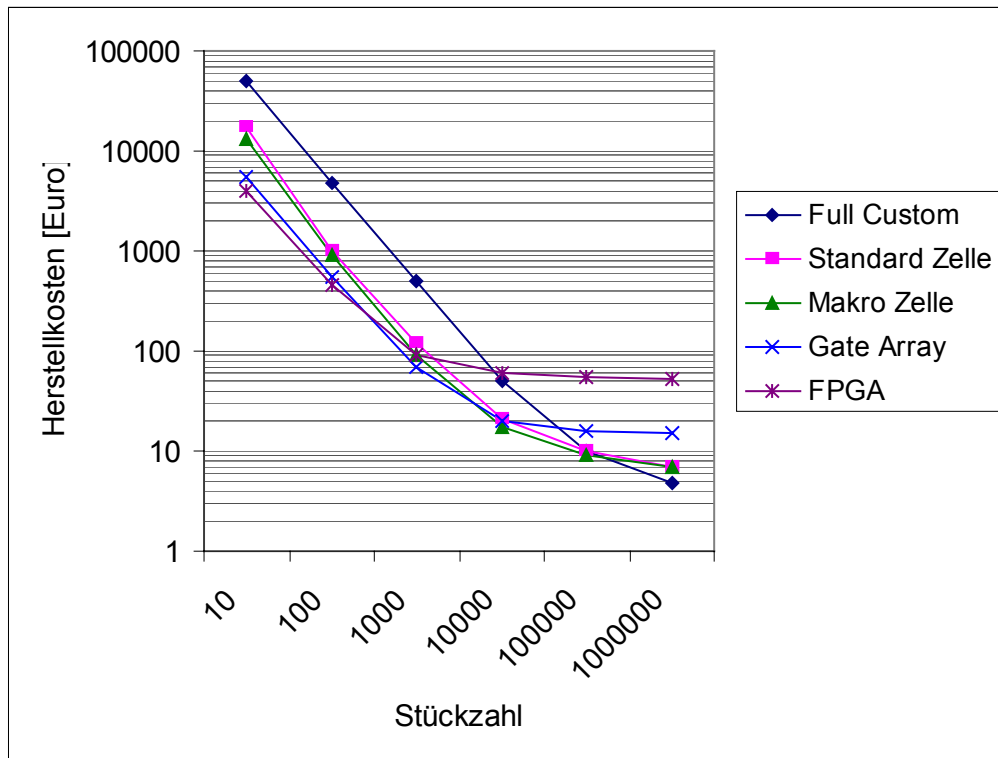
Abhängig von Produkt und Anwendung der LCU wird das LCB aus einem oder mehreren Standard-ICs oder als ASIC (Application Specific Integrated Circuit) nach einem anwendungsspezifischen Entwurf realisiert. Für Stückzahlen jenseits der Kleinserie lohnt sich bereits ein ASIC-Entwurf. Hierbei können abhängig von der Komplexität der Basiszelle fünf Entwurststile unterschieden werden: Ein Full-Custom-ASIC bietet die größtmögliche Entwurfssfreiheit. Entwurf und Layout sind für einen bestimmten ASIC spezifisch. Unter einer Standard-Zelle versteht man einen vordefinierten Block, der in der Regel eine logische Funktion nicht allzu hoher Komplexität wie z.B. NAND, NOR oder Flipflop erfüllt. Unter einer Makro-Zelle versteht man einen vordefinierten Block, der im Unterschied zu Standard-Zellen eine erhebliche Komple-

xität aufweist. Beispiele sind RAM- und ROM-Zellen sowie ALUs bis hin zu ganzen Prozessorkernen. Auf einem Gate-Array sind die Transistoren zu vordefinierten Basiszellen verschaltet, die matrixförmig angeordnet sind. Die vorgefertigten Wafer können vorrätig gehalten werden, so dass für die Kunden nur noch die oberen Metall-Verbindungen spezifisch hergestellt werden müssen, was die Produktionszeit verkürzt. Unter dem Begriff Field Programmable Gate Array (FPGA) versteht man programmierbare logische Bauelemente mit komplexen Logikzellen. Der wesentliche Vorteil von FPGAs liegt in der extrem kurzen Produktionszeit, weil sie nicht durch einen technologischen Schritt, sondern einen Programmiervorgang zum kundenspezifischen ASIC werden.

Zu den ASIC-Kosten wird hier zusammenfassend das Ergebnis einer Analyse in [JAN-01] wiedergegeben. Für ein Beispiel-IC mit 20.000 Gatteräquivalenten wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt, deren Ergebnis in Tabelle 2 und Bild 31 zusammengefasst ist. Bei einer Lebensdauerstückzahl von ca. 1.000 Stück wird das Break-Even-Volume zwischen der FPGA-Lösung und der Gate-Array-Lösung erreicht, das zwischen Gate-Array und Standard-Zellen sowie Makro-Zellen bei ca. 10.000 Stück. Erst oberhalb von etwa 100.000 Stück wird die Full-Custom-Lösung am günstigsten. Die Wahl des Entwurfstils hängt hauptsächlich von der Lebensdauerstückzahl und der angestrebten Time-to-Market ab.

Entwurfstil	Full-Custom	Standard-Zelle	Makro-Zelle	Gate-Array	FPGA
Fixkosten [Euro]	423.000	140.000	110.000	58.000	28.000
Variable Kosten [Euro]	3,96	6,36	6,36	14,47	56,48

Tabelle 2: Kosten eines ASIC mit 20.000 Gatteräquivalenten [JAN-01]



**Bild 31:** IC-Kosten in Abhängigkeit von der Lebensdauerstückzahl für ein ASIC mit 20.000 Gatteräquivalenten [JAN-01]

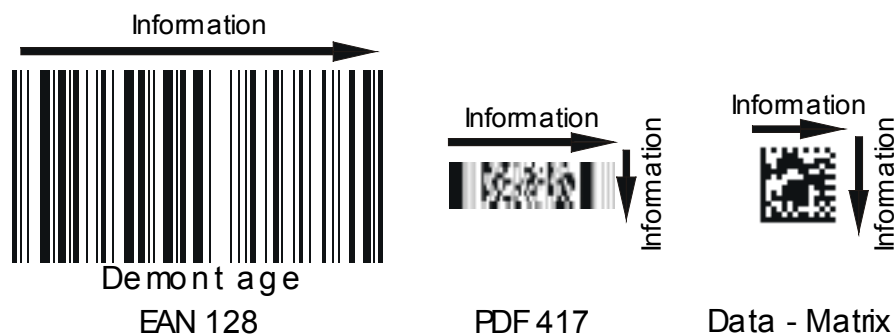
## 2.5.2 Speicher

Die erfassten und ggf. verarbeiteten Abnutzungs- und Produktinformationen müssen für eine Übertragung und Umsetzung produktbegleitend als Daten gespeichert werden. Hierzu können für preisgünstige Produkte und Anwendungen mit kleinem Speicherplatzbedarf als Markierungen fungierende Lackfarben und Barcodes sowie für Anwendungen mit mittlerem bis großen Speicherplatzbedarf Halbleiterspeicher verwendet werden.

### 2.5.2.1 Markierungen

Als preisgünstige Speichertechnologie für Anpassungsinformationen wird die Möglichkeit der Speicherung mit Lackfarben betrachtet. Müssen größere Datenmengen als mit Lackfarben möglich, gespeichert werden, so bietet sich die Barcodetechnologie an. Mit Markierungen aus Lackfarben werden Informationen in einer codierten Form statisch gespeichert, so dass sie sensorisch leichter erfasst und wiedergewonnen werden können. Die Information wird durch Farbe und Form der Markierung zu Daten codiert. Mit Hilfe einer Bildverarbeitung (Kapitel 5.2) werden die Daten decodiert und die Informationen wiedergewonnen. Ein Barcode stellt Daten in verschlüsselter Form eindimensional (Linearcode) oder zweidimensional (Matrixcode) dar. Mit Hilfe von Matrixcodes können bis zu 4296 alphanumerische oder 7089 numerische

Zeichen gespeichert werden. Bild 32 stellt den Größenvergleich von drei Codesymbolen mit dem codierten Wort „Demontage“ dar.



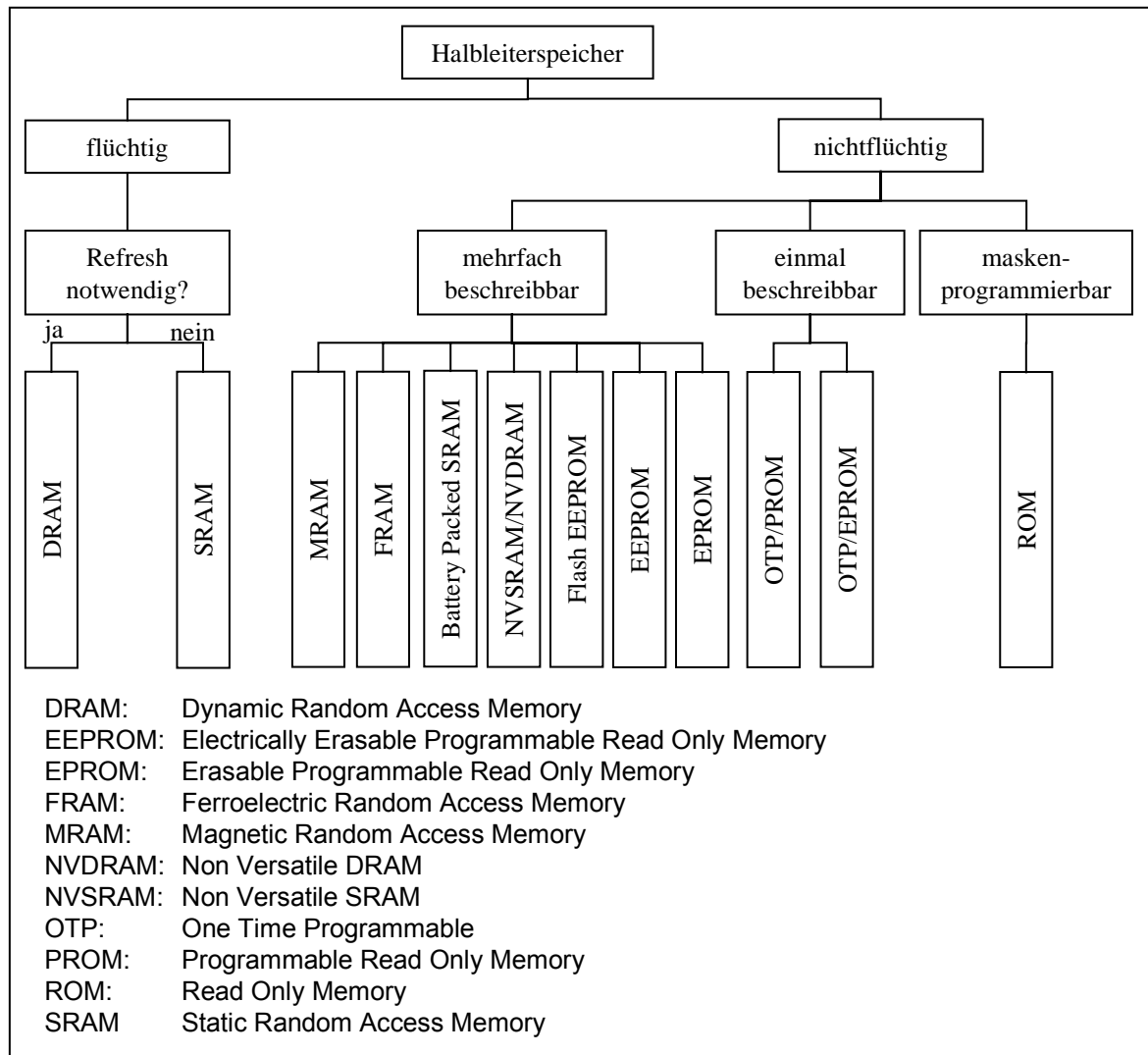
**Bild 32:** Größenvergleich von drei Codesymbolen mit dem codierten Wort „Demontage“

Für eine einfache Erkennung werden die Barcodes mit Lackfarben markiert. Dadurch können sie mit Hilfe eines Bildverarbeitungssystems erkannt und einem Barcodeleser gelesen werden. In Kapitel 5.3 wird die Möglichkeit der Speicherung von Anpassungsinformationen mit Barcodes vorgestellt.

### 2.5.2.2 Halbleiterspeicher

Der Speicher ist die Funktionseinheit innerhalb eines Digitalrechners, die digitale Daten aufnehmen, aufbewahren und auf Anforderung wieder abgeben kann [KRÜ-90]. Bild 33 zeigt die Gliederung der Halbleiterspeicher. Grundsätzlich kann zwischen flüchtigem und nichtflüchtigem Speicher unterschieden werden.

Je nach Anforderung an das Produkt und seine Anwendung werden verschiedene Speicherarten zum Teil auch parallel (Beispiel: PC) verwendet. So wird DRAM eingesetzt, wenn höchste Speicherdichten bei geringen Preisen angestrebt werden. Allerdings erfordert DRAM ein Refresh. Zusätzlich hat ein DRAM eine relativ hohe Verlustleistung.



**Bild 33:** Gliederung der Halbleiterspeicher nach [SIK-00]

Sind kürzeste Zugriffszeiten gefordert, so wird SRAM anstatt DRAM eingesetzt. Außerdem weisen diese eine geringe Verlustleistung auf. Als Nachteil erweisen sich die etwa doppelt so hohen Produktionskosten gegenüber einem DRAM. Ein EEPROM findet Anwendung, wenn kleinere Datenmengen nichtflüchtig gespeichert werden sollen. Mit Hilfe von Flash-Speichern werden große Datenmengen nichtflüchtig und kostengünstig gespeichert. Nachteilig bei Flash-Speichern ist die geringe Schreib- und Programmiergeschwindigkeit. Allerdings gewinnen Flash-Speicher immer mehr an Bedeutung bei portablen Produkten. Um die jeweiligen Vorteile einer Speicherart zu nutzen, werden oft parallel verschiedene Speicher in einem System verwendet. Als Beispiel sei die Organisation des Hauptspeichers eines PC erwähnt: Für die große Datenmenge wird das langsamere DRAM, als kleinerer Cache-Speicher das SRAM verwendet. DRAMs besitzen zurzeit einen Marktanteil von fast 75% bei den Halbleiterspeichern. Die Zukunft der Halbleiterspeichertechnik weist in Richtung FRAM und MRAM. Beide erreichen die Geschwindigkeit eines SRAM, die Speicher-

ichte eines DRAM bei nichtflüchtigem Verhalten von Flash-Speichern [SIK-00, BER-00].

Kriterien							
Typ	nichtflüchtig ?	Refresh notwendig ?	wiederbeschreibbar ?	Speicherichte	Schreib- geschwindigkeit	Lese- geschwindigkeit	Produktreife
ROM	ja	nein	nein	sehr hoch	-	mäßig	sehr hoch
PROM	ja	nein	nein	mäßig	gering	mäßig	sehr hoch
EPROM	ja	nein	ja	gering	gering	mäßig	sehr hoch
EEPROM	ja	nein	ja	gering	gering	mäßig	sehr hoch
Flash-EEPROM	ja	nein	ja	hoch	gering	Hoch	hoch
SRAM	nein	nein	ja	mäßig	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
DRAM	nein	ja	ja	sehr hoch	hoch	hoch	sehr hoch
FRAM	ja	nein	ja	sehr hoch	hoch	hoch	mäßig
MRAM	ja	nein	ja	sehr hoch	hoch	hoch	gering

Tabelle 3: Kriterien von Halbleiterspeichern [SIK-00]

### 2.5.3 Interface

Das Interface oder auch Schnittstelle ist die Berührungsstelle zwischen Systemen und Umgebung bzw. zwischen zwei Systemteilen [KRÜ-90]. Die physikalische Übertragung der gespeicherten und ggf. verarbeiteten Daten kann drahtgebunden über Medien wie Kupferkabel, Glasfaser und Lichtwellenleiter sowie drahtlos über Radiowellen, Infrarot- und Laserlicht erfolgen. Eine Verkabelung ist im Verhältnis zu anderen Techniken relativ preiswert und stabil in der Übertragung. Im Zuge der schnellen Verbreitung von mobilen Computern und Kommunikationsgeräten wie Funktelefon und PDA wird auch immer mehr die Kommunikation selbst mobil, d.h. drahtlos erfolgen. Bei großen Entfernungen haben sich GSM und DECT etabliert. Besonders interessant für mobile Geräte ist der Nahbereich. Neben dem IrDA-Standard wird sich in Zukunft der neue vielversprechende „Bluetooth“-Ansatz durchsetzen. Bluetooth arbeitet mit Funkwellen und nutzt das lizenzfreie Industry Science Medicine Band (ISM-Band), das in Europa und den USA im Bereich von 2,400 GHz bis 2,483 GHz liegt. Die Spezifikation sieht eine Bandbreite von 2,4 bis 2,5 GHz vor, womit Bluetooth weltweit einsetzbar ist. Die Reichweite beträgt 10m und bis zu 300m mit Verstärker [HAS-00].

Fast alle am Markt verfügbaren Mikrocontroller und Interfacebausteine unterstützen serielle Schnittstellen der Standards RS232 und RS449. Zusätzlich unterstützen einige Mikrocontroller Busstandards wie CAN und Ethernet.

Ist das Interface des Mikrocontrollers, der als LCB dient, als Funkschnittstelle ausgeführt, so ist das LCB ein Transponder (TRANsmit and resPOND). Transponder sind kontaktlose Mikrocontroller. Im einfachsten Fall besteht ein Transponder aus einem kleinen und nur etwa 0,2mm dicken IC und mindestens einer geschlossenen Draht- oder Leiterbahnschleife als Antenne. Derzeitige Transponder haben zumeist eine Speichergröße von unter einem Kilobyte. Transponder können aktiv oder passiv ausgeführt werden. Im ersten Fall bezieht der Transponder die benötigte Energie aus einer Batterie oder einer Spannungsversorgung des Produktes, in dem es integriert ist. Passive Transponder entnehmen die zum Betrieb benötigte Energie einem magnetischen Wechselfeld, das von der Antenne eines Schreib-/Lesegerätes erzeugt wird.

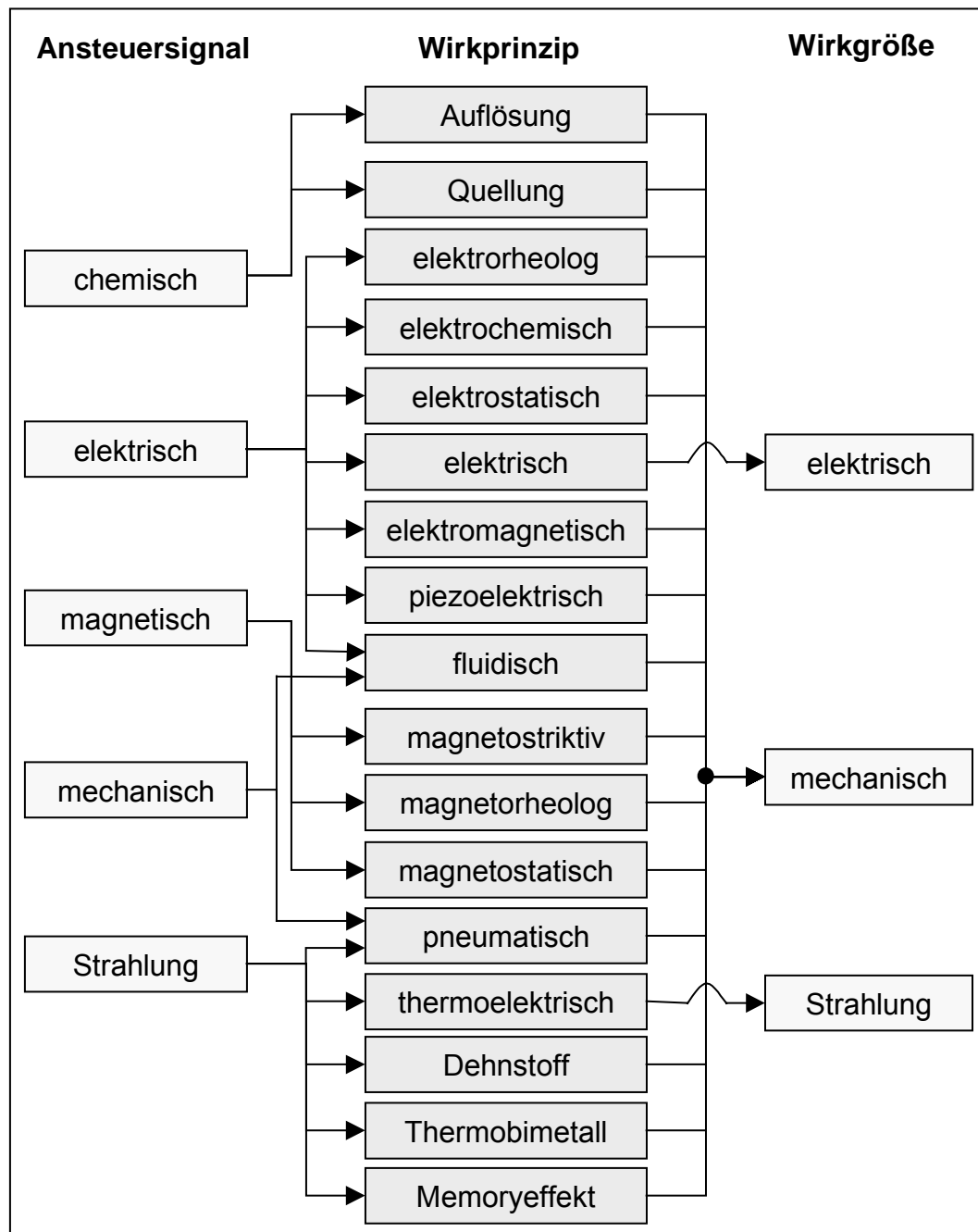
## 2.6 Aktoren

Die LCU setzt die Anpassungsinformationen mit Hilfe von Aktoren um. Der Begriff Aktor ist bisher nicht einheitlich definiert. In den Bereichen Elektronik und Maschinenbau werden durch Aktoren die mit Hilfe der Informationsverarbeitung erzeugten Ansteuersignale in Stellgrößen umgesetzt [HEI-98]. Im Bereich der Mikrosystemtechnik geben Aktoren bei Eingabe eines elektrischen, optischen oder thermischen Signals eine physikalische Größe wie Kraft, Drehmoment, Dimensions- und Phasenänderung aus [MEN-97]. In Anlehnung und Erweiterung dieser Definitionen ist im Rahmen dieser Arbeit ein Aktor ein Wandler, der ein chemisches, elektrisches, magnetisches, mechanisches oder in Form von Strahlungsenergie vorkommendes Ansteuersignal mit Hilfe eines Wirkprinzips in eine elektrische, mechanische oder strahlungsphysikalische Wirkgröße umwandelt. Die beiden Funktionen der Aktoren im LCU-Konzept sind ‚Entgegenwirken den physischen Veränderungen‘ und ‚automatisierte Demontage durch aktorische Verbindungselemente‘. Der Markt für Aktoren stellt sich noch weitaus heterogener als der für Sensoren dar, da er ein von Nischen- und Spezialentwicklungen dominierter Markt ist. In Bild 34 sind die Aktoren nach Ansteuersignal, Wirkprinzip und Wirkgröße klassifiziert dargestellt. In Tabelle 4 wird den Wirkprinzipien Ansteuersignal, Stoff und Wirkenergie zugeordnet, um eine Auswahl von geeigneten Wirkprinzipien zur Erfüllung der Demontagefunktion von Aktoren in Verbindungselementen zu ermöglichen.

Zur Anwendung in der LCU eignen sich aus heutiger Sicht vor allem die folgenden Aktoren: Auflösungs- und Quellungsaktoren sowie Dehnstoff-, Memoryeffekt- und Thermobimetallaktoren integriert in Verbindungselementen könnten durch Zugabe des entsprechenden Auflösungs- oder Quellungsmittels bzw. durch Erzeugen eines Temperaturfeldes das Verbindungselement lösen und damit die Komponenten des Produktes separieren. Besonders geeignet erscheinen Verkleidungen eines Produktes, das sie als erste Schicht des Produktes großflächig benetzt bzw. im Fall von



Dehnstoff-, Memoryeffekt- und Thermobimetallaktoren einem Temperaturfeld ausgesetzt werden können.



**Bild 34:** Klassifizierung der Aktoren nach dem Ansteuersignal, Wirkprinzip und Wirkgröße

Im Gegensatz dazu können in Verbindungselemente integrierte elektrostatische, elektromagnetische oder magnetostatische Aktoren gezielt mit einem lokal wirkenden elektrostatischen, elektromagnetischen bzw. magnetostatischen Feld gelöst und geschlossen werden, so dass auch Komponenten innerhalb eines Produktes nicht zerstörend separiert werden können.

Wirkprinzip	Ansteuersignal	Stoff	Wirkenergie
Auflösung	z.B. Säure, Wasser	z.B. Kunststoff	mechanisch
Dehnstoff	Temperatur	Dehnstoff	mechanisch
Elektrochemisch	Spannung	Gas/Flüssigkeit	mechanisch
Elektromagnetisch	Strom	-	mechanisch
Elektorrheolog	Strom/Spannung	Emulsion	mechanisch
Elektronisch	Strom/Spannung	-	elektrisch
Elektrostatisch	Spannung	-	mechanisch
Fluidisch	Strom, Druck	Medium	mechanisch
Magnetorheolog	Magnetfeld	Emulsion	mechanisch
Magnetostatisch	Magnetfeld	-	mechanisch
Magnetostruktiv	Magnetfeld	-	mechanisch
Memoryeffekt	Temperatur	Metalle, Polymere	mechanisch
Piezoelektrisch	Spannung	-	mechanisch
Pneumatisch	Druck	Luft	mechanisch
Quellung	z.B. Wasser	z.B. Stärke	mechanisch
Thermobimetallisch	Temperatur	Bimetall	Mechanisch
Thermoelektrisch	Strom	-	strahlungs- physikalisch

**Tabelle 4:** Wirkprinzipien zur Unterstützung der Demontagefunktion von Aktoren in Verbindungselementen

Elektronische Aktoren dienen in der LCU als Schalter eines Meldesignals und einer elektrischen Versorgungsspannung. So kann eine LCU einer Schlauchleitung zum Befüllen und Abpumpen eines Kesselwagens mit gefährlichen, aggressiven Medien im Fall eines durch einen Sensor erfassten Schadens der Schlauchleitung einen Thyristor schalten, der dann das Abrissventil schließt (Kapitel 4.7). Fluidische Aktoren, als Ventil dienend, könnten ein heiß gelaufenes Lager kühlen. Als Pneumoelemente ausgeführte Verbindungselemente könnten durch Unterdruck das Verbindungselement lösen und so das Produkt demontieren. Allerdings könnte der Unterdruck nicht gezielt an ein Verbindungselement herangebracht werden, so dass das Produkt oder die Komponente als Ganzes demontiert würde.

## **2.6.1 Chemische Aktoren**

### **2.6.1.1 Auflösungs- und Quellungsaktoren**

Auflösungs- und Quellungsaktoren werden durch nasschemische Einwirkung verändert. Ein Quellungsaktor, der z.B. aus Stärke besteht, quillt unter Zugabe von Wasser auf. Dadurch kann ein Keil in einem Verbindungselement bewegt werden, so dass das Verbindungselement gelöst wird. Auflösungsaktoren werden z.B. durch Säuren

aufgelöst. Ein anderes Beispiel für chemische Aktoren sind wasserlösliche Elemente, die durch ihr vollständiges Auflösen das Verbindungselement lösen [NEU-95].

### **2.6.1.2 Elektrochemische Aktoren**

An einem mit Gas gefüllten abgeschlossenen Gefäß führt das Anlegen einer Gleichspannung zur Erhöhung des Gefäßinnendrucks. Der Abbau des Drucks erfolgt durch Umpolen oder einen Kurzschluss. Dieser Effekt kann durch unterschiedliche chemische Reaktionen erzeugt werden. Für den gasförmigen Zustand findet die Brennstoffzellenreaktion auf Basis der Elektrolyse des Wassers und die Sauerstoffpumpe mit der Sauerstoffreduktion Verwendung. Im Festkörperbereich wird die Reaktion einer Silberelektrode in alkalischem Elektrolyt angewendet. Elektrochemische Aktoren werden als Positioniereinrichtungen, einfache Stellantriebe und Heizkörperventile verwendet [HEI-98, JAN-92].

## **2.6.2 Physikalische Aktoren**

### **2.6.2.1 Dehnstoffaktoren**

In Dehnstoffelementen wird die starke Volumen-Temperatur-Abhängigkeit von festen oder flüssigen Stoffen mit großen Wärmeausdehnungskoeffizienten genutzt [JAN-92]. Mit Hilfe von konstruktiven Maßnahmen kann dieser Effekt zur Erzeugung der Hubbewegung eines Arbeitskolbens eingesetzt werden. Die Anwendungen liegen in den Bereichen einfacher Stellantriebe für Heizkörper und Starteinrichtungen für Vergasermotoren [HEI-98]. Als Dehnstoffe werden Wasser (sog. Gefriereslement), Wachs, Paraffin und Silikonöl verwendet. Allgemein sind die Dehnstoffaktoren mechanisch robust, unempfindlich gegen elektromagnetische Störfelder und preiswert. Sie erreichen hohe Stellkräfte bei allerdings großen Stellwegen. Ihr Temperaturbereich ist auf den Bereich von -20 bis 120°C begrenzt und die Dynamik liegt im mittleren Bereich mit Reaktionszeiten zwischen 8 und 50 Sekunden<sup>2</sup>. Bei Schmelzelementaktoren werden Schmelzelemente als Sperrelemente bei Verbindungselementen benutzt, um durch Freigabe einer Feder dieses zu lösen. Als Schmelzelement können Lote mit niedrigem Schmelzpunkt verwendet werden [NEU-95].

### **2.6.2.2 Elektromagnetische Aktoren**

Elektromagnetische Aktoren beruhen auf der Induktion. Der durch eine Leiterschleife fließende Strom bewirkt eine translatorische oder rotatorische Bewegung der Leiterschleife, wenn diese sich in einem Magnetfeld befindet. Bedingt durch die Bewegungsrichtung können diese Aktoren als lineare oder rotierende Antriebe verwendet werden.

---

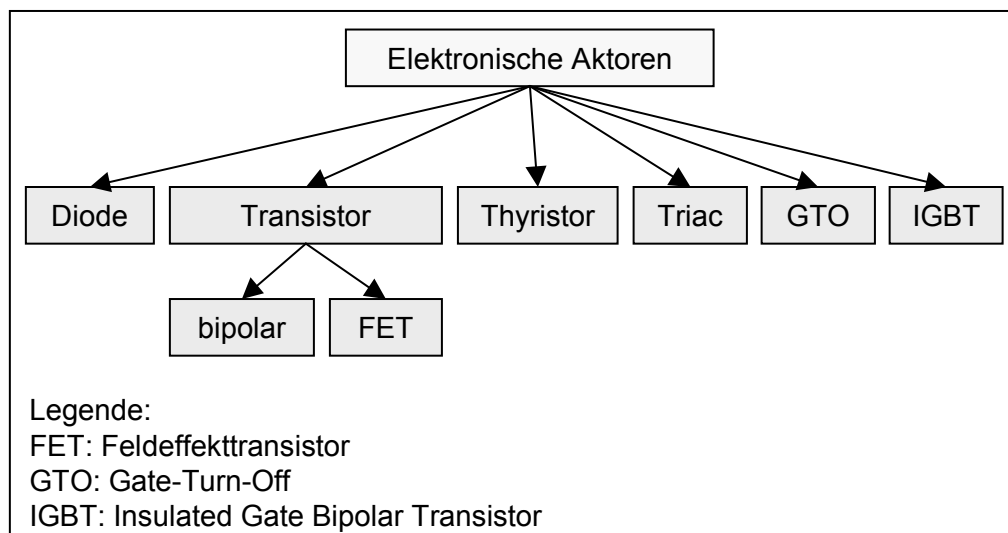
<sup>2</sup> Dehnstoff-Arbeitsselemente. Technisches Prospekt der Behr-Thomson, Dehnstoffregler GmbH, Kornwestheim

### 2.6.2.3 Elektrorheologische Aktoren

Der elektrorheologische Effekt bezeichnet die Viskositätsänderung einer Flüssigkeit im elektrischen Feld. Das Anlegen eines elektrischen Gleich- oder Wechselfeldes an eine Flüssigkeit führt zu deren Erstarren. Erst ab einer bestimmten Grenzscheerspannung wird diese wieder fließfähig. Elektrorheologische Flüssigkeiten werden in schaltbaren Kupplungen, für Ventile, in Motorlagern und in Stoßdämpfern eingesetzt [HEI-98, GRO-97].

### 2.6.2.4 Elektronische Aktoren

Elektronische Aktoren beruhen auf der Dotierung von Halbleitern und den aus verschiedenen Ansteuerungen resultierenden Zuständen von Leitung und Nichtleitung des elektrischen Stroms. Sie dienen der Realisierung von Schaltfunktionen.



**Bild 35:** Klassifizierung elektronischer Aktoren

### 2.6.2.5 Elektrostatische Aktoren

Die Grundlage dieser Aktoren bilden die elektrostatischen Anziehungskräfte entgegengesetzt geladener Pole. Ein Beispiel eines elektrostatischen Aktors stellt die in [MIN-99] vorgestellte elektrostatische Muffe dar. Durch Anlegen einer Gleichspannung wird eine elektrostatische Kraft erzeugt, die den Abstand zwischen zwei Flanken verringert und so zu einer Kontraktion des Bauelementes führt.

### 2.6.2.6 Fluidische Aktoren

Die Energie eines Flüssigkeits- oder Gasstromes wird in fluidischen Aktoren durch Steller dosiert und in mechanische Größen gewandelt. Angesteuert über ein elektrisches Signal können so über die Kontrolle der Parameter Drehzahl und Drehmoment Geschwindigkeiten und Kräfte erzeugt werden. Fluidische Aktoren werden eingesetzt zur Dosierung und Richtungssteuerung eines Mediums und zur Erzeugung von Geschwindigkeiten, Kräften sowie Längs- und Rotationsbewegungen. Die Realisierung

erfolgt im ersten Fall durch Ventile, im zweiten durch Motoren. Anwendungsgebiete der Mikrofluidik sind Dosiersysteme für medizinische Zwecke oder chemische Analysensysteme. Es werden deshalb umfangreiche Anstrengungen durchgeführt, um mit verschiedenen mikrotechnischen Methoden Mikromotoren und -pumpen sowie Mikroventile zu realisieren [MEN-97].

#### **2.6.2.7 Magnetorheologe Aktoren**

Beim Anlegen eines magnetischen Feldes zeigen magnetorheologe Flüssigkeiten eine Änderung der Viskosität [HEI-98]. Dabei ist die Orientierung der Feldlinien gegenüber der Strömungsrichtung der magnetorheologen Flüssigkeit von großer Bedeutung. Am deutlichsten ist der magnetorheologische Effekt für einen Winkel von  $90^\circ$  zwischen Fließrichtung der Flüssigkeit und den Feldlinien [GRO-97]. Aktoren mit magnetorheologen Flüssigkeiten sind gut steuerbar. Dadurch sind sie für den Einsatz als Schnittstelle zwischen Elektronik und mechanischen Systemen wie Kupplungen, Schwingungsdämpfern, Motorlagern und Ventilen gut geeignet.

#### **2.6.2.8 Magnetostatische Aktoren**

Die Grundlage dieser Aktoren bilden die magnetostatischen Anziehungs- und Abstoßungskräfte entgegengesetzt bzw. gleichsinnig geladener Magnetpole. In Kapitel 5.5 werden nach dem magnetostatischen Wirkprinzip arbeitende aktorische Verbindungselemente vorgestellt.

#### **2.6.2.9 Magnetostriktive Aktoren**

Beim Anlegen eines magnetischen Feldes an einen ferromagnetischen Kristall kommt es auf Grund der Ausrichtung der Weisschen Bezirke in Magnetisierungsrichtung zur Verschiebung der Kristallgrenzen. Es tritt eine volumeninvariante Längenänderung auf. Magnetostriktive Aktoren werden als Translatoren, als Wurmmotor, als Einspritzventil für Dieselkraftstoff und als aktive Schwingungsdämpfer eingesetzt. In der Demontage einsetzbar ist der Wurmmotor (Bild 36). Dieser besteht aus einem Stift aus magnetostriktivem Material und den um das Durchgangsloch gewickelte Spulen, die sich in den zu fügenden Teilen befinden. Bei der Montage wird der Stift wie ein herkömmlicher Stift in das Durchgangsloch eingeschlagen. Zur Demontage wird zunächst Spule 1 und anschließend Spule 2 beschaltet. Im Ergebnis bewegt sich der Stift wie in der Abbildung dargestellt.

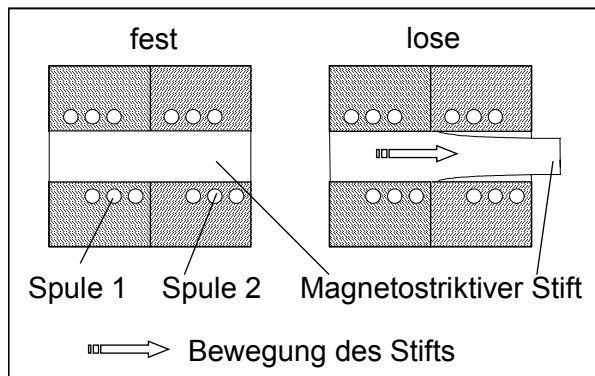


Bild 36: Prinzipskizze eines magnetostriktiven Wurmmotors nach [JEN-95]

### 2.6.2.10 Memoryeffektaktoren

Unterhalb einer bestimmten Temperatur verhalten sich Werkstoffe mit Memoryeffekt (Formgedächtniseffekt) wie normale Konstruktionswerkstoffe. Oberhalb einer bestimmten Temperatur unterliegen sie einer spezifischen Änderung ihrer Form, die bei Bedarf in niedrigeren Temperaturbereichen wieder rückgängig gemacht werden kann. Werkstoffe für Aktoren mit Formgedächtniseffekt sind Metalle oder Polymere. Der Unterschied zwischen diesen Werkstoffklassen in Bezug auf die Aktorik besteht in der Erzeugung von relativ großen Kräften bei der Formänderung metallischer Werkstoffe. Nachteil der Metalle ist ihr zurzeit noch hoher Preis. Metalle mit Formgedächtniseffekt (SMA) sind vor allem Legierungen aus Nickel und Titan (NiTi) oder Kupfer, Zink und Aluminium. Polymere mit Formgedächtniseffekt (SMP) bestehen aus Werkstoffen wie Polyurethan, Polypropylen oder ABS (Acrylnitril-Butadien-Styren). Polymere und Metalle mit Formgedächtniseffekt können als Thermoschalter, mit Ventulfunktion in Vergasern, als Stellglieder mit geringer Dynamik, Memory-Schrauben und -Bolzen bzw. Federn und Hülsen zur Bolzen- oder Schraubenhalterung eingesetzt werden. Weiterhin sind Anwendungen zur Erleichterung der Demontage von Integrierten Schaltkreisen bekannt, bei denen Zwischenstücke aus Formgedächtnismaterial zwischen Schaltkreis-Sockel und Platine eingebaut werden [CHI-97, CHI-99, CHI-99a].

### 2.6.2.11 Piezoelektrische Aktoren

Die Grundlage der piezoelektrischen Aktoren bildet der reziproke piezoelektrische Effekt. Dieser nutzt den Umstand, dass eine an ein Piezokristall angelegte Spannung zu einer Dickenänderung führt. Piezoelektrische Aktoren werden als Stapel- und Streifentranslatoren, Biegeelemente, Wurmmotor und Ultraschall-Motor eingesetzt.

### 2.6.2.12 Pneumatische Aktoren

Luftgefüllte, dichte Hohlkörper mit teilweise elastischen oder beweglichen Wandungen, so genannte Pneumoelemente, wölben oder bewegen sich bei Änderungen des Umgebungsdrucks. Auf diese Weise geben sie mechanische Arbeit ab. Diese Ele-

mente können sowohl gegen einen verminderten als auch gegen einen erhöhten Luftdruck Arbeit verrichten [KRA-00]. In [NEU-00] werden Funktionsmuster von pneumatisch lösbaren Verbindungen vorgestellt.

#### **2.6.2.13 Thermobimetallaktoren**

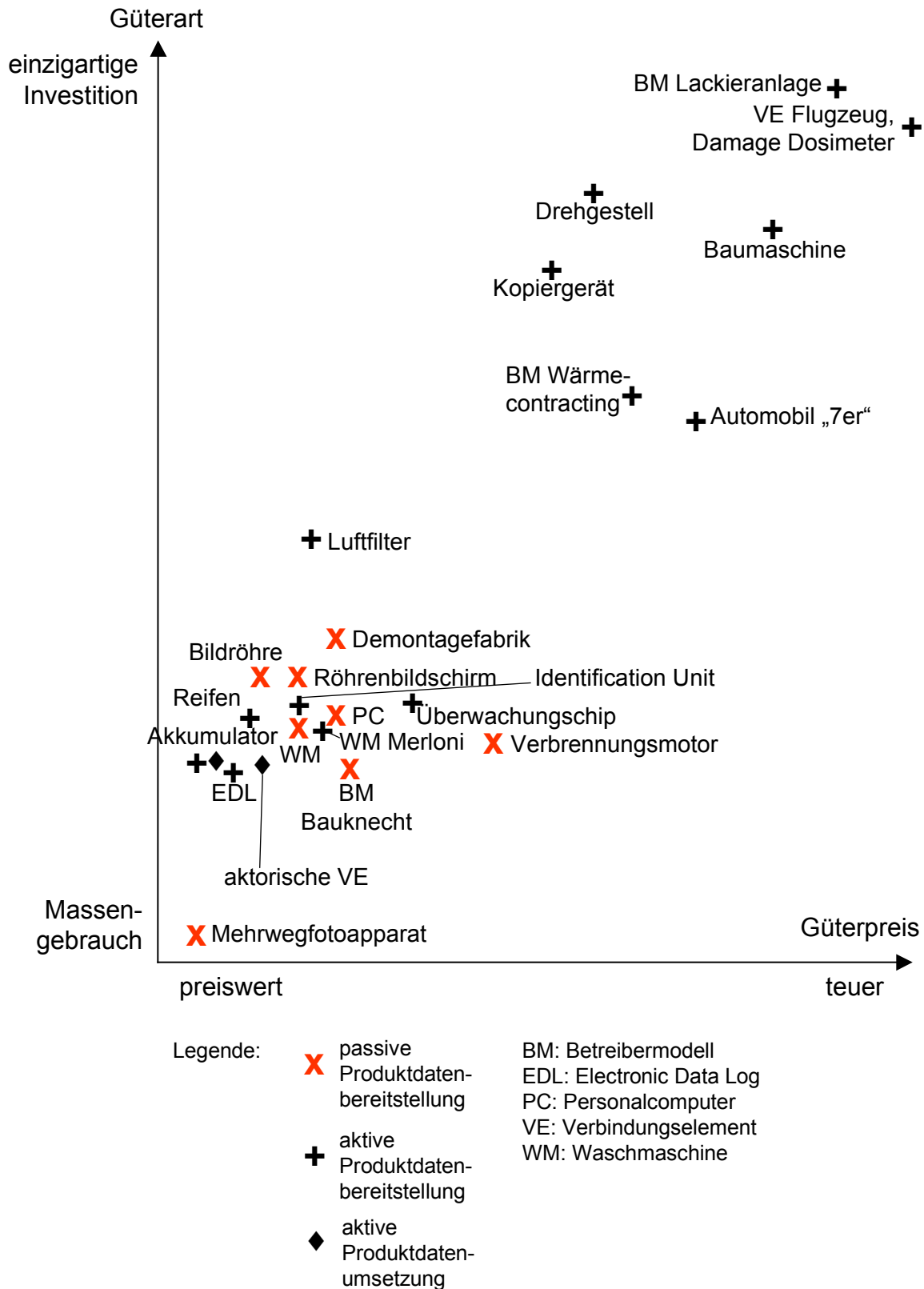
Bei einer Erwärmung führt die unterschiedliche Wärmedehnung zweier fest miteinander verbundener Metalle zu einer Krümmung des Werkstückes [HEI-98]. Thermobimetall-Aktoren werden unter anderem als Thermo- und Schalter eingesetzt. In [NEU-95, SCH-95a] werden Schnappverbindungen mit thermobimetallischen Aktoren vorgestellt. Nach Angaben der Autoren wird der Einsatz jedoch durch Mindestbaugrößen beschränkt. Die Steuerung der Thermobimetall-Aktoren kann durch Konduktion, Konvektion und Wärmestrahlung erfolgen.

#### **2.6.2.14 Thermoelektrische Aktoren**

Ein thermoelektrischer Aktor stellt die Umkehrung eines thermoelektrischen Sensors, d.h. eines Thermoelementes dar. Das physikalische Wirkprinzip ist der Peltier-Effekt. Wird einem Kreis, der aus zwei Materialien mit verschiedenen Niveaus in der thermoelektrischen Spannungsreihe besteht, ein Strom eingeprägt, dann kühlt sich eine Verbindungsstelle ab, die andere Verbindungsstelle erwärmt sich. Sog. Peltier-Elemente werden am häufigsten als transportierbare Kühlboxen für Medikamente oder als Kühlfächer in Autos eingesetzt. Eher selten wird die Technik für große Kühlschränke verwendet. Am weitesten verbreitet ist die thermoelektrische Kühlung bei der Temperaturkontrolle, vor allem in wissenschaftlichen Instrumenten, elektronischen und optoelektronischen Systemen wie Laser und Infrarotsensoren. Gegenüber herkömmlichen Temperiereinheiten bieten Peltier-Elemente Vorteile wie direkte Umsetzung von elektrischer Energie in Wärme, Vibrationsfreiheit, kleine Abmessungen und die Fähigkeit hohe Temperaturdifferenzen (Kaltseitentemperaturen bis  $-70^{\circ}\text{C}$ ) zu erreichen [HEI-98].

### **2.7 Anwendungen**

Anwendungsfelder der LCU reichen grundsätzlich von teuren einzigartigen Investitionsgütern, deren kontinuierliche Funktionsfähigkeit laufend kontrolliert und ggf. wiederhergestellt werden muss, bis zu preiswerten Massengütern des Gebrauchs, deren großer Ressourcenverbrauch dadurch reduziert werden soll, dass weitere Nutzungsphasen über Kompensation von Abnutzung durch Anpassung ermöglicht werden. In Bild 37 sind die in diesem Kapitel vorgestellten realisierten oder sich im Entwicklungsstadium befindenden Systeme und auf diesen basierende Dienstleistungen – wie Betreibermodelle – vorgestellt, die jeweils in Teilbereichen der Funktion der LCU entsprechen.



**Bild 37:** Anwendungen LCU-ähnlicher Systeme

Bisher wurden vor allem Systeme entwickelt, die durch Bereitstellung von Anpassungsinformationen den Anpassungsprozess Demontage erleichtern. Hierbei kann



man zwischen der passiven Form der Bereitstellung (Kapitel 2.7.1) und aktiven Form der Bereitstellung (Kapitel 2.7.2) von Anpassungsinformationen unterscheiden.

Über Produkte, die diese Daten nicht selbst bereitstellen, können nur passiv, d.h. mit Sensoren außerhalb des Produktes, Informationen gewonnen werden. Stellt dagegen ein Produkt aktiv Anpassungsinformationen zur Verfügung, so müssen diese nicht mehr durch externe Sensoren gewonnen werden. Die aktive Form der Datenbereitstellung hat gegenüber der passiven den Vorteil, Informationen kontinuierlich aus der Nutzungszeit des Produktes bereitstellen zu können. Nur bei den beiden Beispielen Akkumulator und aktorische Verbindungselemente in Kapitel 2.7.3 werden die bereitgestellten Informationen aktiv umgesetzt. Bei allen anderen Beispielen werden die Informationen passiv, d.h. durch externe Aktoren z.B. in einer Demontagezelle, umgesetzt. In Bild 37 sind alle im folgenden beschriebenen Beispiele qualitativ nach Güterart und Güterpreis geordnet dargestellt.

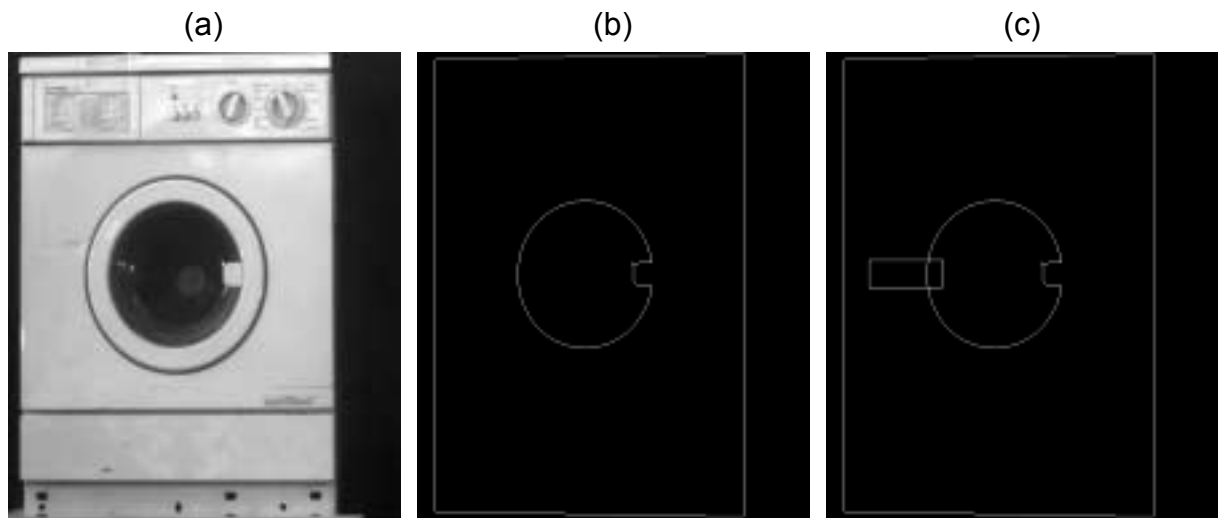
Auffällig ist, dass teurere Güter vornehmlich mit Systemen der aktiven Produktdatenbereitstellung ausgestattet werden. Wie die Beispiele Mehrwegfotoapparat von Fuji und Bildröhre (Kapitel 2.7.1) zeigen, funktioniert die passive Form der Produktdatenbereitstellung nur dann gut, wenn die Produkte durch den Hersteller auch recycelt werden. In diesem Fall hat der Hersteller genaue Kenntnis über das zu demontierende Produkt. Zwar wird auch mit der Bildröhre nur ein Produkt demontiert, jedoch kommt das Produkt in verschiedenen Varianten verschiedener Herstellern vor. Des Weiteren ist hier der Produktrecycler (Kapitel 4.8.1.1) nicht gleichzeitig Hersteller von Bildröhren, so dass ihm keine Produktinformationen aus der Herstellung für die Demontage zur Verfügung stehen. Abhilfe böte ein produktbegleitendes Informationssystem wie die LCU, das einen Demontageplan vorhält.

Sowohl die Systeme der passiven als auch der aktiven Produktdatenbereitstellung sind zumeist auf Einzelanwendungen zugeschnittene Entwicklungen, die als Einzelstück oder Kleinserie hergestellt werden. Es fehlt eine allgemeine und umfassende Konzeptentwicklung eines Systems, das produktbegleitend Anpassungsinformationen bereitstellt und ggf. selbst für die Anpassung umsetzt sowie als standardisiertes, modulares und skalierbares Massenprodukt Kostendegressionseffekte nutzen könnte. Dieses Konzept wird als LCU entwickelt.

### **2.7.1 Passive Produktdatenbereitstellung**

Im Sonderforschungsbereich 281 „Demontagefabriken“ werden Werkzeuge und Verfahren zur Durchführung der Demontage entwickelt. So werden in [SEL-01] flexible, formunabhängige Endeffektoren vorgestellt, die durch Erzeugung neuer Wirkflächen Kräfte und Momente zum Lösen und Handhaben übertragen und nicht auf die gegebene Geometrie durch Werkzeugwechsel reagieren. Durch diese Flexibilität

kann die Anzahl der Werkzeugwechsel sowie der Betriebsmittel deutlich verringert werden.



**Bild 38:** (a) Originalbild, (b) Erkennung Fensterkomplex, (c) Erkennung Griff



**Bild 39:** Informationen zum erkannten Waschmaschinentyp, links: Originalbild Waschmaschine; rechts: Originalbild mit erkannten Merkmalen [SEL-00a]

Ein realisiertes flexibles Demontagesystem für das Beispielprodukt Waschmaschine eröffnet eine Vielzahl von Möglichkeiten der Demontageautomatisierung. Zum Einsatz kommen unter anderem Bildverarbeitungssysteme zum Erfassen der Position

von Schrauben am Schwingsystem der Waschmaschine, um dieses automatisiert demontieren zu können [SEL-00b].

Ein in der Zukunft zu realisierender Ansatz ist die Bereitstellung des Demontageplans durch ein Produkt mit integrierter LCU, so dass das Produkt automatisch demontiert werden kann. In [SEL-00a] wird zur Unterstützung der Planung und Steuerung der Demontage von Waschmaschinen ein Bildverarbeitungssystem beschrieben, das den Typ der Waschmaschine erkennt. In Bild 38 sind die Ergebnisse der Erkennung von Glas und Griff des Fensterkomplex dargestellt. Bild 39 zeigt den erkannten Typ der Waschmaschine. In [SCH-99] wird eine flexible, robotergestützte Demontagezelle für Röhrenbildschirmgeräte vorgestellt, die mit Unterstützung der in einer Datenbank abgelegten Demontageprogramme Bildschirme demontiert. Die hierbei zum Einsatz kommende Sensorik erkennt Positionsabweichungen von Verbindungselementen, Kabelsträngen oder Bauteilen, registriert fehlende oder abweichende Bauteile wie z.B. Längsschlitz- statt Kreuzschraube und identifiziert Verbindungselemente, die sich aufgrund von Veränderungen während ihrer Gebrauchsphase nicht mehr zerstörungsfrei demontieren lassen. In [HOH-00] wird eine Farbbildverarbeitungseinheit mit einem neu entwickelten Segmentierungsalgorithmus für die nachfolgende Objekterkennung vorgestellt. Das System bestehend aus der Farbbildverarbeitungseinheit, Objekterkennung, Laserdistanzsensorik sowie taktiler Kraft/Momenten-Sensorik wird bei der Demontage von PCs eingesetzt.

In der Automobilindustrie werden Verbrennungsmotoren industriell aufgearbeitet [LIE-98, STE-98]. So arbeitet DaimlerChrysler jährlich ca. 22.000 Motoren auf, die nach einer kompletten manuellen Demontage komponentenweise die Prozessschritte Reinigung, Prüfung und Sortierung, Aufarbeitung und Remontage durchlaufen [PER-00]. Unabhängig von ihrem Zustand werden sämtliche Verschleißteile durch Neuteile ersetzt. Ebenfalls in [PER-00] werden verschiedene Produkte vorgestellt, die zur Weiter- und Wiederverwertung und -verwendung demontiert werden. Dabei findet eine vollkommen sensorisch unterstützte automatisierte Demontage nur bei Mehrwegfotoapparaten der Firma Fuji statt. Bildröhren von Fernsehgeräten und Monitoren werden von der Firma Vicor GmbH<sup>3</sup> mit dem Ziel manuell demontiert, die beiden Glaskomponenten Bildschirm und Konus für eine Weiter- und Wiederverwertung und -verwendung sortenrein zu trennen. Die Prozessschritte 'Bestimmung der Bildröhrengroße' und 'Finden der Lotnaht' werden sensorisch unterstützt [SEL-95].

Die Systeme der passiven Produktdatenbereitstellung arbeiten zumeist mit optischen Sensorsystemen. Das Problem ist die starke Abhängigkeit der optischen Komponenten von der Beleuchtung der Szene. Schon kleine Veränderungen wie z.B. Sonnenlicht können eine aufwendige Neukalibrierung erfordern oder gar zum Versagen

---

<sup>3</sup> VICOR GmbH, Wilhelminenhofstrasse 76/77, 12459 Berlin

der Bilderkennung führen. Weiterhin muss bei neuen Produkten und Varianten in einem zeitlich aufwendigen Lernprozess das Bildverarbeitungssystem trainiert werden. Ferner müssen die Produktdatenbanken mit Referenzbildern zwecks Mustererkennung gefüllt und gepflegt werden. Aus diesen Gründen konnte sich die passive Bereitstellung von Produktdaten mit Hilfe von Bildverarbeitungssystemen zu Anpassungszwecken bisher nicht nennenswert in der Praxis etablieren.

Eine Verbesserung der Erkennungsrate von Bildverarbeitungssystemen auch bei wechselnden Lichtverhältnissen kann durch den Einsatz von Markierungen – wie im LCU-Konzept vorgesehen – erreicht werden (Kapitel 5.2 und 5.3).

### **2.7.2 Aktive Produktdatenbereitstellung**

Mit Systemen der aktiven Produktdatenbereitstellung wird das Produkt in die Lage versetzt, eine Selbstauskunft zu erteilen. In [SCH-95] wird die Entwicklung von intelligenten Verbindungselementen zur Überwachung von Korrosionsparametern wie pH-Wert und Temperatur in unzugänglichen Umgebungen bei Flugzeugen beschrieben. Die Air Force gibt jährlich über 1 Mrd. US\$ für Reparatur von Korrosionsschäden an Flugzeugen aus. Die Verbindungselemente sollen rechtzeitig vor einem Bauteilversagen über das Ausmaß der Korrosion informieren, so dass eine Anpassung eingeleitet werden kann. In [SCH-94] wird ein als „Identification Unit“ bezeichnetes Konzept vorgestellt, das für eine Wiederverwendung von Produkten die Lebensgeschichte und zusätzliche Produktinformationen speichert. Dabei wird zwischen aktiven und passiven Daten unterschieden: aktiv ist die Produktlebensgeschichte, passiv sind beispielsweise Herstellername, Art und Ort von gefährlichen Materialien sowie Art der verwendeten Werkstoffe. Es befindet sich je eine „Identification Unit“ in jeder wichtigen Komponente des Produktes. Die „Identification Units“ kommunizieren untereinander über einen „green bus“. Das Anwendungsfeld der „Identification Unit“ umfasst die Gebrauchsgüter der Weißen und Braunen Ware. Die analytischen und experimentellen Grundlagen zur Bestimmung der Lebensdauer auf der Basis einer Erfassung und insbesondere Auswertung von Lebenszyklusdaten werden nicht ausgeführt. Ein zur „Identification Unit“ vergleichbares Konzept wird in [SIM-98] vorgestellt. Ein System bestehend aus Sensoren und einem Mikrocontroller befindet sich im Produkt und speichert die Lebensgeschichte mit dem Ziel, diese für Marketing, Zuverlässigkeitsaussagen, Wartung, präventive Instandhaltung, Garantie und Entsorgung zu verwenden.

Für die präventive Instandhaltung von Flugzeugen wurde von der Firma Boeing in [SMI-98] ein als „Damage Dosimeter“ bezeichnetes Datenerfassungssystem vorgestellt, welches der Erfassung von Rissen in Flugzeugtragflächen dient. Hierzu werden beim belasteten Bauteil drei mechanische Spannungen mit drei Dehnungsmessstreifen sowie dessen Temperatur erfasst und gespeichert. In [GRI-98] wird ein als „Electronic Data Log (EDL)“ bezeichnetes System beschrieben, das aus einem Mik-

rocontroller und Sensorik besteht. Das EDL speichert den Lebenslauf eines Produktes mit dem Ziel, Aussagen über Produktqualität und Restlebenszeit von Komponenten für eine Wiederverwendung zu treffen. Weitere Ziele sind eine vereinfachte Fehlersuche, Dokumentationsfunktion bei Garantieansprüchen und Nutzung des gespeicherten Lebenslaufs für Produktverbesserungen in der Zukunft. Das EDL ist skalierbar ausgelegt. Beispielhaft realisiert wurde das System am Beispiel des Motors einer Waschmaschine, bei dem Strom und Temperatur gemessen werden. Ein durchgeführter Kostenvergleich zwischen einem mit und ohne EDL ausgestatteten Elektromotor ergab Vorteile für den Motor mit EDL durch Kostensenkungspotentiale einer präventiven Instandhaltung und damit begründeter längerer Lebensdauer.

Zur Kontrolle von Computersystemen, Kommunikationszentralen, medizinischen Geräten, Steuerungen und anderen mikrocontrollergesteuerten Geräten mit hohem Zuverlässigkeitsanspruch werden spezielle Überwachungschips verwendet. Sie sind einer LCU bestehend aus den beiden Untersystemen Sensorik und LCB vergleichbar. Ein Beispiel stellt der Multi-Systemmonitor-Chip LM78 der Fa. National Semiconductor dar. Durch Erfassung von Busaktivitäten, Temperaturen, Lüftergeschwindigkeiten, Versorgungsspannungen und Gehäusealarm wird der Produktzustand mit dem Ziel einer präventiven Instandhaltung bereitgestellt [ELV-98].

In [BET-99] wird ein neuartiges Luftfilterkonzept vorgestellt, bei dem durch Messung der Filterverschmutzung und des Stromverbrauchs der optimale Zeitpunkt für einen Filterwechsel berechnet wird. Der Aufwand für Energie- und Wartungskosten wird dadurch um bis zu 70% reduziert.

Durch Erfassung und Auswertung der Schwingungsverläufe der Wälzlager von Pumpen wird bei der Wallstein GmbH eine präventive Instandhaltung von Aggregaten mit dem Ziel der Reduktion von Anlagenausfällen und Reparaturen durchgeführt [BOO-01]. Bei diesem Beispiel wird ausgeführt, welche Kosten durch einen nicht erkannten Lagerschaden bei Maschinen bzw. Anlagen entstehen können. Die reinen Kosten für den Lagerwechsel liegen bei ca. 500 DM inklusive Wälzlager und einer Stillstandszeit von drei Stunden. Ein nicht erkannter Lagerschaden, der mit 100 prozentiger Sicherheit zum Crash führt, hätte ein Vielfaches an Kosten sowie erhebliche organisatorische Probleme verursacht. Im günstigsten Fall wären zwölf Arbeitsstunden á 70 DM sowie die Überholung der Pumpe in Höhe von etwa 9.000 DM angefallen. Bei einem irreparablen Schaden der Pumpe hätten Kosten in Höhe von über 16.000 DM allein für die neue Pumpe aufgewendet werden müssen. Es wird gezeigt, dass ein nicht erkannter Schaden eines einfachen Wälzlagers im Wert von 50 DM zu beträchtlichen Schäden führen kann. Zurzeit werden die Wälzlager in diesem Betrieb der Wallstein GmbH durch regelmäßige Schwingungsmessungen gekoppelt mit Trendanalysen überwacht. Eine LCU böte die Sicherheit kontinuierlicher Überwachung und unverzüglicher Schadensmeldung.

Zunehmend Anwendung finden sog. „Reifenwächter“. Das sind Messsysteme zur Erfassung und Auswertung des Reifendrucks bei Automobilen, die das Ziel haben, eine höhere Fahrsicherheit und längere Lebensdauer der Reifen zu erreichen. Diese auch „Fülldruck-Überwachungssystem“ benannten Systeme erfassen Druck und Temperatur des Reifens und warnen den Fahrer bei Druckverlust. Es gibt Systeme, die sich der Messwerte des ABS-Systems bedienen und dadurch keine eigenen Sensoren benötigen als auch Systeme mit eigenen Sensoren, welche direkt am Reifen Druck und Temperatur erfassen. Die Ziele der Reifenwächter sind der pan-nensichere Reifen durch präventive Instandhaltung und der Verzicht auf das Reserverad zur Gewichtsreduzierung [MAY-00]. Beim Konzept der Firma Continental werden durch direkte Messung der auf die Reifen wirkenden Längs- und Querkräfte mit Hilfe von Magnetfeldsensoren neben einem Reifendefekt auch Daten für Fahrerassistenzsysteme wie ABS und ESP erfasst. Dadurch können die Sensoren dieser Systeme entfallen [AUT-00].

Ein Unternehmen in Japan [ODR-00] stattet schwere Baumaschinen mit einem System zur Fernüberwachung und -diagnose aus, um sie vor Diebstahl zu schützen und eine präventive Instandhaltung zu ermöglichen. Durch eine Standortbestimmung via GPS sowie Erfassung und Übertragung vielfältiger Betriebsdaten an ein zentrales firmeneigenes Rechenzentrum können dem Kunden detaillierte Daten seiner Baumaschinen bezüglich Standort, Auslastung, Kraftstoffverbrauch und zustandsabhängige Planung der Instandhaltung bereitgestellt werden. Aufgrund dieses Zusatznutzens konnte der Hersteller für seine Baumaschinen einen Preisaufschlag von 10% am Markt durchsetzen. Merloni, ein italienische Hersteller von Haushaltsgeräten, hat seine Vision von zukünftigen Haushaltsgeräten in Form einer Waschmaschine im Jahr 1999 auf den europäischen Markt gebracht. Die Funktionen des Gerätes namens „margherita2000“ lassen sich über eine eigens für jede Maschine erstellte Webpage oder über ein internetfähiges Mobiltelefon steuern. Zur Überwachung der Maschine werden vom sog. „Digital Service Center“ Zustandsdaten abgerufen. Durch die Diagnose kann der Nutzer beim Auftritt von Gerätefehlfunktionen telefonisch, über SMS, E-Mail oder Fax benachrichtigt werden [MAR-01].

Bei Schienenfahrzeugen liegt das Verhältnis zwischen den Investitionen und über den Lebenslauf subsummierten Instandhaltungsaufwendungen abhängig vom Fahrzeugtyp zwischen 25 und 50% [GRO-99, LEH-99]. Es wird ersichtlich, dass Bahnbetreiber die Aufwendungen für die Instandhaltung senken wollen. Bahnbetreiber unterscheiden die vorbeugende und korrigierende Instandhaltung. Bei der vorbeugenden Instandhaltung wird versucht, durch Wartung, Inspektion und planmäßige Instandsetzung den geforderten Zustand zu erhalten bzw. den drohenden Ausfall zu vermeiden. Hierbei werden die notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen abhängig

vom Befund als Planarbeit oder sog. Überplanarbeit bezeichnet. Planarbeiten sind geplante Arbeiten, während Überplanarbeiten aufgrund des Befunds einer planmäßigen Instandhaltung zusätzlich anfallen, d.h. laut Instandhaltungsplan nicht geplant waren. Eine korrigierende Instandhaltung wird benötigt, wenn ein plötzlicher Ausfall eintritt. Korrigierende Instandhaltungsmaßnahmen sind immer außerplanmäßig [SCH-96]. Das Ziel ist es, die Häufigkeit der außerplanmäßigen Instandhaltung zu minimieren und die Überplanarbeiten ähnlich wie die Planarbeiten so weit wie möglich planbar zu gestalten. In Einzelfällen kann das Aufwandsverhältnis von Außerplan- zu Überplanarbeiten bei 300 zu 1 liegen. Bezogen auf bestimmte Triebfahrzeugtyp tragen Über- und Außerplanarbeiten zu deutlich mehr als 50% der gesamten Instandhaltungsaufwendungen bei. Allgemein ist der Instandhaltungsaufwand von Baugruppen mit rein mechanischen Komponenten besser planbar als der von Baugruppen mit elektrischen und elektronischen Komponenten. Bei diesen Baugruppen erreichen Über- und Außerplanarbeiten zusammen fast 75% der Instandhaltungsaufwendungen [TRE-96]. Häufig ist bei diesen Baugruppen mit besonders ungünstigem Ausfallverhalten die Planung einer vorbeugenden Instandhaltung nicht möglich, da das auf Basis empirischer Daten prognostizierte Ausfallverhalten nicht zutrifft. Für diese Baugruppen weichen Ausfall- und geplanter Instandhaltungszeitpunkt zufällig voneinander ab [WIE-96, TRE-99, WAC-96]. Bei diesen Baugruppen würde eine kontinuierliche Erfassung des Lebenslaufs durch eine LCU die Planung der Instandhaltung ermöglichen.

In [HEC-98] wird ein Konzept für ein Diagnosesystem für Güterwagendrehgestelle vorgestellt. Durch Kraft- und Wegmessung an allen vier Achslagern werden verschiedene Baugruppen des Drehgestells wie Bremsanlage, Primärfederung und Radlager überwacht, um Parameter wie Bremskraft, Lastverteilung und Radprofil zu regeln. Durch das Konzept sollen wesentliche Fortschritte in der Verfügbarkeit der Waggons, der Senkung des Instandhaltungsaufwandes und dem Vermeiden gefährlicher Zustände erreicht werden. Eine zustandsbezogene Instandhaltung und Aussagen hinsichtlich Transportqualität bei Güterwagen soll das in [MRO-98] beschriebene Konzept ermöglichen. Es werden allgemein die Entwicklungsschwerpunkte Energieversorgung, Sensorik, Bordcomputer und Kommunikationstechnik benannt. Die beiden Ziele sollen durch Erfassung von Transportbelastungen, Heißläufern, Ladungsgewicht und Laufweg erreicht werden.

Der Kopiererhersteller Xerox vertreibt unter dem Namen „Green Line“ Kopiergeräte, die zu ca. 80% aus aufgearbeiteten Komponenten bestehen. Zurückgeführte Kopiergeräte werden demontiert, gereinigt, sortiert und nach Qualitätskriterien neuer Komponenten geprüft. Bei Erfüllung dieser Kriterien fließen die gebrauchten Komponenten in den Produktionsprozess neuer Geräte ein. Durch eine modulare Gestaltung der Geräte konnte die Anzahl der Bauteile von 2000 auf 250 Stück reduziert werden, was zu Kostensenkungen aufgrund reduzierter Demontage- und Remonta-

geumfänge geführt hat [THE-95, NAS-98]. Die Anpassungsinformationen werden hierbei sowohl passiv als auch aktiv bereitgestellt.

Bei höherwertigen teuren Konsumgütern werden Diagnosesysteme eingesetzt, um die Wartung nach Bedarf und nicht nach Wartungsplan durchführen zu können. So wird beim neuen Spitzenmodell von BMW, dem „7er“, auf Basis von 13 überwachten Fahrzeugelementzuständen wie z.B. der Zündkerzen und des Motoröls ein von der Fahrzeugabnutzung und vom Fahrstil abhängiger Zeitpunkt für den Austausch dieser 13 Elemente festgelegt [SKA-01]. Die zunehmende Forderung von Kunden kundenspezifische Lösungen anzubieten, die in Leistung pro Einheit eingekauft werden, zwingen Hersteller, sich mit Betreibermodellen auseinander zu setzen [SPA-01]. Als Beispiel aus der Automobilindustrie sei statt des Verkaufs einer Lackieranlage die Dienstleistung „Lackieren eines Autos“ genannt [HIR-00].

Der Stromanbieter Yello will in Kooperation mit dem Hausgerätehersteller Bauknecht Kühlschränke, Geschirrspüler, Waschmaschinen und Wäschetrockner für private Haushalte für 36 DM pro Gerät und Monat vermieten. Das Angebot umfasst die Anlieferung, Installation, kostenlose Abholung und kostenlose Reparatur durch Bauknecht. Der Kunde muss sich verpflichten, das Gerät nur zum haushaltsüblichen Gebrauch zu nutzen und die Gebrauchsanweisung zu beachten [FAZ-01]. Sowohl die Dokumentation der Nutzung als auch eine automatische Instruktion des Nutzers könnten durch die LCU gewährleistet werden.

In seiner Dissertationsschrift führt PERLEWITZ aus, dass die klassische, in Form einer Investitionsrechnung durchgeführte, Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bei der Beschaffung komplexer Produktionsanlagen die Anschaffungskosten im Vergleich zu den Betriebs- und sonstigen Folgekosten überbetont. Hingegen achtet das Konzept der Lebenszykluskosten auf die Realisierung minimaler Gesamtkosten, da sich Betriebs- und Folgekosten auf ein Vielfaches der Anschaffungskosten belaufen [PER-99].

Die gesamten Lebenszykluskosten einer Produktionsanlage setzen sich aus folgenden Kostenbestandteilen zusammen:

- Einmalaufwand (anlagenbezogen): Planung, Konstruktion, Beschaffung, Erstersatz, geplante Umbauten, Stilllegung,
- geplante Betriebskosten: fixe und variable Maschinenkosten, lohnbezogene Fertigungskosten, Overhead und
- ungeplante Folgekosten: ungeplante Instandhaltung, Nichtverfügbarkeit, Ausschuss, ungeplanter Umbau/Optimierung, Nacharbeit.

Hierzu führte PERLEWITZ am Beispiel einer Pilotanlage im Karosserie-Rohbau der Automobilproduktion eine Analyse der Lebenszykluskosten durch. Die Kosten verteilen sich dabei wie folgt:



- Einmalaufwand (anlagenbezogen): 25% der gesamten Lebenszykluskosten,
- geplante Betriebskosten: 44% der gesamten Lebenszykluskosten und
- ungeplante Folgekosten: 31% der gesamten Lebenszykluskosten

Insgesamt belaufen sich die Lebenszykluskosten der Produktionsanlage auf den vierfachen Wert des anlagenbezogenen Einmalaufwandes (Anschaffungswert). Durch den Einsatz einer LCU können insbesondere die ungeplanten Folgekosten eingespart werden. Der Anteil der Kosten für ungeplante Instandhaltung und Nichtverfügbarkeit an den gesamten ungeplanten Folgekosten liegt gemäß der Analyse bei 95%. Wären die Kosten der ungeplanten Instandhaltung und Nichtverfügbarkeit durch den Einsatz der LCU einzusparen, ergäbe sich eine Ersparnis von 29,45% der gesamten Lebenszykluskosten. Das Ergebnis kann nicht verallgemeinert werden, da eine einzelne Produktionsanlage betrachtet wurde. Dennoch kann aus dieser Betrachtung abgeleitet werden, dass im Fall einer Produktionseinrichtung durch den Einsatz einer LCU erhebliche Einsparungen bei den ungeplanten Folgekosten und somit bei den gesamten Lebenszykluskosten erreichbar sind. Im Rahmen einer an den Lebenszykluskosten orientierten Investitionsentscheidung wird daher eine in den Anschaffungskosten etwas teurere Produktionsanlage mit LCU der günstigeren Alternative ohne LCU in vielen Fällen vorzuziehen sein.

Die beiden monetär bewerteten Beispiele des Wälzlagers und der komplexen Produktionsanlage verdeutlichen die Potenziale eines Einsatzes der LCU. Darüber hinaus werden mit sinkenden Kosten der LCU im Zuge der Entwicklung der Mikrosystemtechnik zu einem Massenproduktionsverfahren auch die Anwendungsfelder auf preisgünstige Produkte erweitert werden können.

### **2.7.3 Aktive Produktdatenumsetzung**

Die bereitgestellten Anpassungsinformationen werden in der Nutzungsphase angewendet, um durch Anpassung der Abnutzung entgegen zu wirken. Dabei kann die Umsetzung wie die Bereitstellung in einer passiven oder aktiven Form durchgeführt werden. Bei der passiven Form wird das Produkt durch seine Umgebung, z.B. ein Anpassungssystem (Kapitel 4.3), angepasst, wohingegen es sich bei der aktiven Form mit Hilfe integrierter Aktoren selbst anpasst. Der Zeitpunkt der Umsetzung der bereitgestellten Anpassungsinformationen ist die Anpassung. Bei allen bisher in den Kapiteln 2.7.1 und 2.7.2 beschriebenen Anwendungsbeispielen werden die Anpassungsinformationen passiv, z.B. bei der Instandhaltung, umgesetzt. Aktiv umgesetzt werden Anpassungsinformationen bei dem in [ROS-99] beschriebenen Blei-Säure-Akkumulator. Ein System bestehend aus Sensorik, Mikrocontroller und Aktorik erweitert einen gewöhnlichen Blei-Säure-Akkumulator zu einem intelligenten in seinen Leistungswerten deutlich verbesserten Produkt. Durch Erfassung von Betriebsbedin-

gungen wie z.B. Innen- und Außentemperatur des Akkumulators, Vergleich mit gespeicherten Kennfeldern und Anpassung an optimale Betriebsbedingungen mit Hilfe eines Heizelements werden die Produktparameter entscheidend verbessert: doppelte Lebensdauer, dreifach bessere Kaltstartfähigkeit und vierfach bessere Ladefähigkeit bei 20% weniger Säure, 30% weniger Blei und 40% weniger Gewicht.

Mit Hilfe von aktorischen Verbindungselementen wird eine aktive Demontage ermöglicht. Diese Verbindungselemente werden durch äußere Einwirkungen wie z.B. Temperaturänderung oder ein Magnetfeld gelöst und geschlossen. Diese Funktionalität wird entweder durch einen im Verbindungselement integrierten Aktor oder durch werkstofftechnische Maßnahmen erreicht. Zur zweiten Kategorie aktorischer Verbindungselemente gehören die in [CHI-99] vorgestellten Schrauben, die aus dem Formgedächtnismaterial Polyurethan bestehen. Erste prototypische Anwendungen werden bei elektrischen Kleingeräten vorgestellt. Dabei wurde festgestellt, dass diese Verbindungselemente in Stückzahlen produziert genauso kostengünstig sind wie Verbindungselemente aus Kunststoffen ohne Formgedächtniseffekt.

Die passive Produktdatenbereitstellung kann durch leicht zu erkennende Markierungen vereinfacht werden. Die aktive Produktdatenbereitstellung bietet gegenüber der passiven Vorteile wie

- kontinuierliche Überwachung auf Fehler und Schäden,
- rechtzeitige Warnung vor Schadenseintritt,
- eindeutige Fehlerzuordnung,
- Entfall kostspieliger und zeitraubender Diagnose,
- längere Nutzungsdauer und
- Wertsteigerung des Produktes aufgrund verbesserter Anpassung.

Mit Hilfe der aktiven Produktdatenumsetzung können die beiden aktorischen Funktionen der LCU erfüllt werden. Diese vereinfachen mit Hilfe aktorischer Verbindungselemente die Demontage und wirken durch im Produkt integrierte Aktoren der Abnutzung entgegen. Die LCU bietet die Struktur zur Unterstützung der passiven Produktdatenbereitstellung in Form des Untersystems Markierung, der aktiven Produktdatenbereitstellung durch die Untersysteme Markierung, Sensorik und LCB sowie der aktiven Produktdatenumsetzung mit Hilfe der Untersysteme LCB und Aktorik.

### 3 Handlungsbedarf

Der bisherige Kenntnisstand der Zuverlässigkeitsanalyse zeigt, dass es trotz intensiver Bemühungen nicht gelungen ist, das komplexe Ausfallverhalten mechanischer sowie elektrischer und elektronischer Systemelemente umfassend zu beschreiben und Ausfälle vorherzusagen. Zwei gleiche Bauteile können bei gleicher Belastung in Ausfallverhalten und Lebensdauer variieren. Ein bereits in der Produktentwicklung entwickeltes Zuverlässigkeitsmodell zur Vorhersage der Zuverlässigkeit von Produkten kann daher eine nur eingeschränkte Aussagesicherheit aufweisen. Ursache dieser Einschränkung sind Zuverlässigkeitsmodelle, die mangels Produktlebenslaufdaten nicht optimal an die während der Nutzung auftretende Belastung angepasst sind. Die Bereitstellung von Lebenslaufdaten ausfallgefährdeter Komponenten und Produkte böte die Möglichkeit einen Ausfall vor Schadenseintritt zwecks Anpassung zu diagnostizieren und vorhandene Lebensdauer- und Symptommodelle zu validieren bzw. zu verändern sowie neue zu entwickeln. Aus dem Ausfallverhalten einer Stichprobe kann nicht exakt auf das Ausfallverhalten aller sowie einzelner Komponenten und Produkte geschlossen werden. Ferner werden durch Marktforschung, Serienerprobung und Auswertung von Feldausfällen nicht alle in der Praxis auftretenden Belastungen und Nutzungsmodalitäten abgedeckt. In den meisten Fällen wird nur die Wirkung und Erscheinung eines Ausfalls erfasst, nicht dessen Ursache.

Eine Verbesserung dieser Situation könnte durch eine Doppelstrategie erreicht werden: Erstens müssten vorhandene Lebensdauer- und Versagensmodelle auf Basis von Produktlebensläufen aller im Umlauf befindlichen Produkte verbessert und neue entwickelt werden. Zweitens müssten zur Ausfallvorhersage mit Hilfe von Symptommodellen durch eine LCU Lebensläufe von denjenigen Komponenten und Produkten bereitgestellt werden, für die ein Lebensdauermodell nicht entwickelt werden kann. Trotz vorhandenem Lebensdauermodell empfiehlt sich bei besonders risikobehafteten und sicherheitsrelevanten Bauteilen und Komponenten die Bereitstellung des Lebenslaufs für ein Symptommodell mit dem Ziel der Ausfallvorhersage und rechtzeitiger Anpassung. Zur breitbandigen spezifischen Erfassung der biologisch und chemisch bedingten physischen Veränderungen sind zurzeit noch nicht genügend mikrosystemtechnisch integrierte Bio- und Chemochips verfügbar. Das gilt noch stärker für in Verbindungselemente integrierbare Aktoren zur automatisierten Demontage von Komponenten und Produkten. Wie die in Kapitel 2.7 dargestellten Anwendungen zeigen, kann im Fall der passiven Produktdatenbereitstellung die Anpassung von Produkten nur durch den Hersteller selbst effizient durchgeführt werden, da der Hersteller über ausreichende für die Anpassung relevante Informationen seiner Produkte verfügt. Wie erste Realisierungen der aktiven Produktdatenbereitstellung zeigen, ist sie die geeignetere Methode zur Bereitstellung von Anpassungsinformationen von

Produkten. Allerdings sind die bisher entwickelten Systeme größtenteils Entwicklungen für einzelne Anwendungen. Andere Anwendungen bedürften aufwendiger Neuentwicklungen.

Bisher können Produkte kaum automatisiert z.B. in einer Demontagefabrik angepasst werden, da die hierzu nötigen Informationen nicht bereitgestellt werden. Sie können weder mit Werkzeugen der passiven noch der aktiven Produktdatenbereitstellung zur Verfügung gestellt werden, da passive Werkzeuge nicht leistungsfähig genug und nur wenige Werkzeuge vorhanden sind, die Informationen aktiv bereitstellen. Der gegebene Überblick über Beispiele umgesetzter Anpassungen zeigt, dass vorwiegend Investitionsgüter und teure Konsumgüter mit dem Ziel einer präventiven Instandhaltung angepasst werden. Bei preiswerten Konsumgütern beschränkt sich die Anpassung auf wenige Beispiele von durch Hersteller durchgeführter Demontage und Remontage ihrer Produkte mit dem Ziel einer Wiederverwendung von Komponenten. Sollen im großen Umfang auch preiswerte Konsumgüter angepasst werden, so müssen die Anpassungsinformationen mit kostengünstigen Systemen der aktiven Produktdatenbereitstellung zur Verfügung gestellt werden. Bei Betreibermodellen kauft der Kunde nur noch die Dienstleistung eines Produktes, nicht mehr das Produkt selbst. Der Betreiber hat deshalb ein gesteigertes Interesse, den Nutzen des Produktes möglichst lange und ohne Störung Kunden anbieten zu können. Daraus folgt die Anforderung, das Produkt effektiv und effizient anzupassen. Hierzu müssen Systeme zur Produktdatenbereitstellung verfügbar sein, die Anpassungsinformationen bereitstellen.

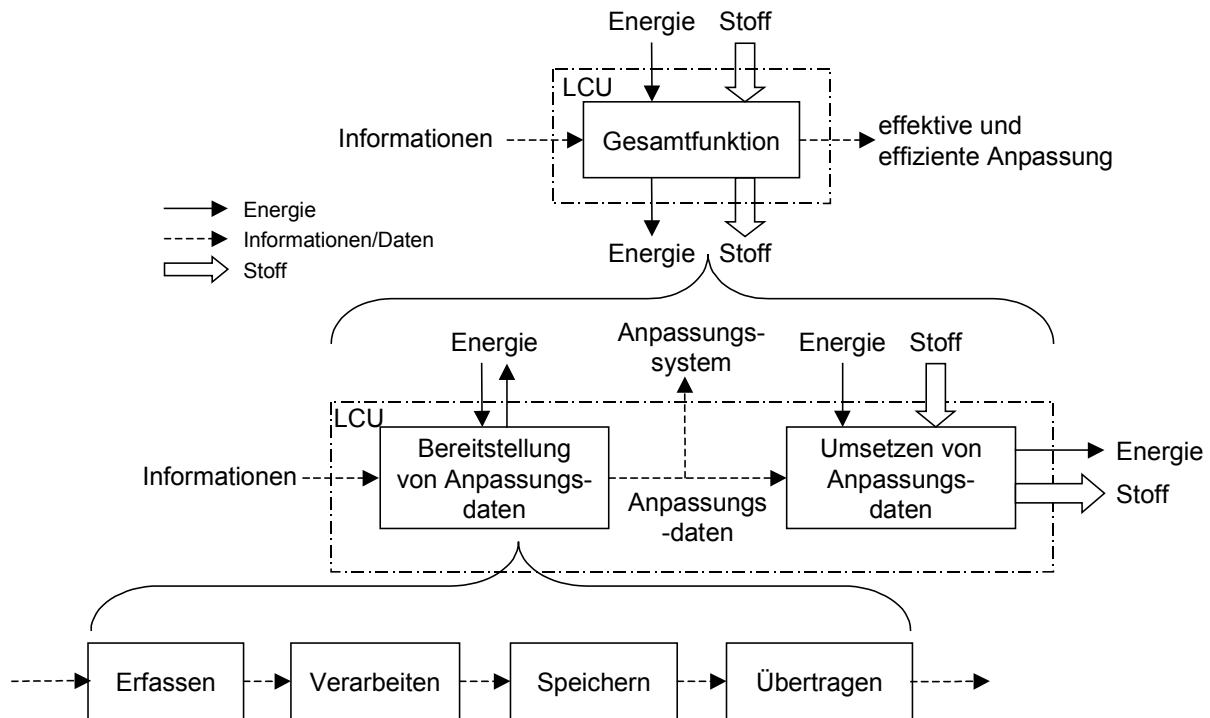
Die identifizierten Handlungsbedarfe kulminieren in der Forderung der Beschreibung einer Architektur eines kostengünstigen technischen Systems zur produktbegleitenden Bereitstellung und Umsetzung von Anpassungsinformationen. Diese Systemarchitektur – Life Cycle Unit LCU genannt – soll als standardisiertes, modular und skalierbar konzipiertes Massenprodukt Kostendegressionseffekte großer Stückzahlen nutzen, so dass es nicht nur bei Investitionsgütern und teuren Konsumgütern, sondern auch bei preiswerten Konsumgütern angewendet werden kann. Weiterhin sollte durch erste Realisierungen ein Beleg der technischen Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit in der Praxis im Hinblick auf das große Anwendungsfeld erbracht werden.

## **4 Systementwicklung**

Auf Basis der im Abschnitt 4.1 zu ihrer Aufgabenerfüllung ermittelten Funktionen wird die LCU in den darauffolgenden Abschnitten systematisch entwickelt. In Kapitel 4.2 werden die für die Anpassung notwendigen Informationen identifiziert sowie die Kopplung der bereitgestellten Produktlebenslaufdaten mit Zuverlässigkeitsmodellen beschrieben. Nachdem in Kapitel 4.3 die Systemstruktur mit einer Beschreibung der Beziehungen der LCU zur Umgebung sowie der vier Untersysteme dargestellt wird, widmet sich Kapitel 4.4 den Kombinationsmöglichkeiten der LCU zu verschiedenen Ausprägungen von Untersystemen. Es folgt eine Betrachtung der Teilsysteme Energie-, Informations- und Stofffluss in Kapitel 4.5. Kapitel 4.6 beschäftigt sich mit der ökonomischen Seite der LCU. Es wird ein Modell zur Kalkulation des Mehrwerts von Produkten mit integrierter LCU für Hersteller und Kunden entwickelt. Die Kalkulation wird am Beispielprodukt Waschmaschine validiert. In Kapitel 4.7 wird an einem Produkt und zwei seiner möglichen Anwendungen gezeigt, von welchen Kriterien die produkt- und anwendungsbezogene Auslegung der LCU abhängt. Die Systementwicklung abschließend werden in Kapitel 4.8 allgemein und am Produktbeispiel Waschmaschine potenzielle Geschäftsfelder der LCU betrachtet. Die Systementwicklung basiert auf dem in [DAE-99] und [SCH-00] beschriebenen Systemdenken.

### **4.1 Funktionsstruktur**

Die Gesamtfunktion der LCU ist die Bereitstellung von Anpassungsinformationen als Daten und deren Umsetzung im Rahmen einer effektiven und effizienten Anpassung von Produkten, Komponenten und Bauteilen. In Bild 40 ist die Gesamtfunktionsstruktur der LCU abgebildet. Die Gesamtfunktion lässt sich in die beiden Teilfunktionen ‚Bereitstellung von Anpassungsdaten‘ und ‚Umsetzen von Anpassungsdaten‘ aufteilen.



**Bild 40:** Gesamtfunktionsstruktur der LCU

Die Teilfunktion ‚Erfassen‘ verarbeitet die erfassten physischen Veränderungen zu Produktzustandsdaten, die durch die Teilfunktion ‚Verarbeiten‘ mit dem Anpassungsplan, den veränderten Anforderungen und dem Zuverlässigkeitsmodell aus Zuverlässigkeitsanalysen zu Anpassungsdaten verknüpft werden. Diese werden durch die LCU mit Hilfe der Teilfunktion ‚Speichern‘ gespeichert und an die Teilfunktion ‚Umsetzen von Anpassungsdaten‘ sowie ggf. zum Anpassungssystem nach außen übertragen. Das Anpassungssystem kommuniziert während einer Anpassung des Produktes mit der LCU (Kapitel 4.3).

Die Anpassungsdaten werden aus den drei Quellen Herstellung, Nutzung und Anpassung des Produktes gespeist. Zum Zeitpunkt der Herstellung werden der LCU die Anpassungsdaten ‚veränderte Anforderungen‘, ‚Anpassungsplan‘ und ‚Zuverlässigkeitsmodell‘ mitgegeben. Nach einer erfolgten Anpassung müssen diese für nachfolgende Anpassungen durch das Anpassungssystem aktualisiert werden. Aus der Nutzung des Produktes stammen die physischen Veränderungen. Umgesetzt werden die Daten durch die LCU zur Anpassung des Produktes auf Bauteil- oder Komponentenebene. Hierzu kann ein Stoffumsatz notwendig sein, um z.B. den Anpassungsprozess Demontage zu ermöglichen.

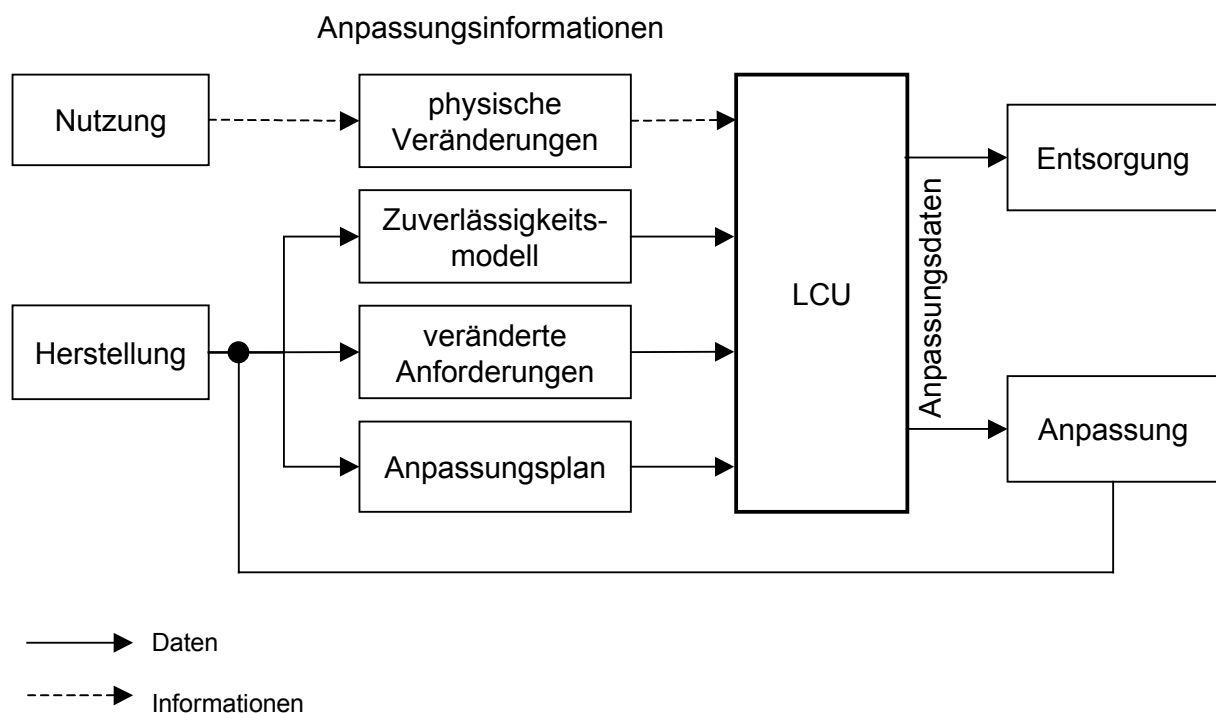
## 4.2 Informationen für Anpassung

Anpassung benötigt die Bereitstellung aller Anpassungsinformationen als Daten. Über die Anpassungsdurchführung erteilt der produktbegleitend durch Markierungen oder mit Hilfe des LCB gespeicherte Anpassungsplan Auskunft. Der Anpassungsplan

besteht aus den Teilplänen Abfuhr-, Zufuhr-, Demontage-, Reinigungs-, Bearbeitungs-, Remontage-, Prüf- und Sortierplan sowie den Stammdaten des Produktes. Ändert sich der Anpassungsplan z.B. aufgrund einer neuen im Produkt integrierten Komponente, so wird der gespeicherte Anpassungsplan aktualisiert. Alle Teilpläne geben Auskunft über die Betriebsmittel, organisatorischen Maßnahmen und Produkte des jeweiligen Anpassungsprozesses. Beispielsweise enthält der Demontageplan Informationen über

- Demontageprodukte (Art, Abmaße, Position, Materialien, Verbindungsarten, Zugänglichkeiten),
- Demontagebetriebsmittel (Art, Betriebsparameter, Zugänglichkeit, bearbeitbare Materialien) sowie
- Demontageablauf.

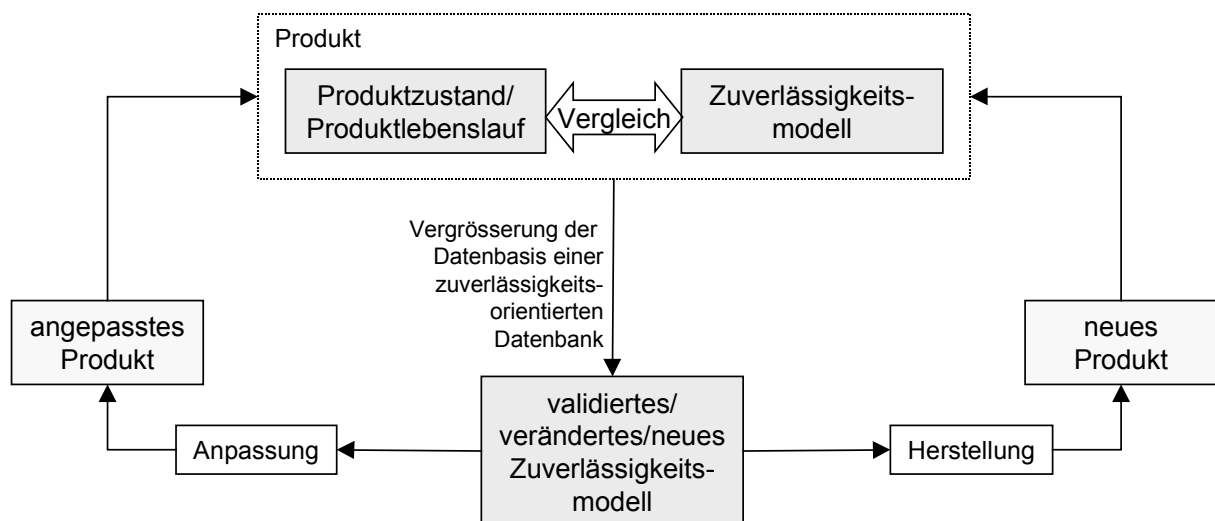
In Bild 41 ist der Fluss der Anpassungsinformationen zwischen den drei Produktlebensphasen Herstellung, Nutzung und Anpassung dargestellt.



**Bild 41:** Anpassungsinformationen

Während der Herstellung werden der LCU als Daten die Anpassungsinformationen Zuverlässigkeitsmodell, veränderte Anforderungen und Anpassungsplan mitgegeben, die während einer Anpassung verändert werden können. Aus der Nutzung stammen die physischen Veränderungen. Alle Anpassungsdaten werden auch für die Entsorgungsphase bereitgestellt, wobei es aus dieser Lebensphase keine Rückkopplung zur Nutzungsphase des Produktes gibt.

Der Zeitpunkt der Anpassung wird durch Informationsvergleich bestimmt. Die physischen Veränderungen, die vom Untersystem Sensorik erfasst und als Produktzustandsdaten dem LCB übertragen werden, werden durch das LCB als Produktzustand gespeichert. Durch Speicherung des zeitpunktorientierten Produktzustands generiert das LCB den zeitraumorientierten Produktlebenslauf. Produktzustand bzw. Produktlebenslauf werden mit den Anpassungsinformationen ‚Zuverlässigkeitsmodell‘ und ‚veränderte Anforderungen‘ des Produktes mit Hilfe des LCB verglichen. In Bild 42 ist der Vergleich zwischen Zuverlässigkeitsmodell und Produktzustand/Produktlebenslauf dargestellt. Beispielsweise wird die Schaltspielanzahl eines mechanischen Schalters erfasst und mit der in Lebensdauerversuchen ermittelten mittleren ausfallfreien Schaltspielanzahl verglichen. Bei Erreichen dieser Anzahl warnt die LCU den Nutzer vor einem möglichen Ausfall des Schalters. Wie aus Bild 42 ersichtlich, wird ein Zuverlässigkeitsmodell mit der LCU auf zwei Arten gekoppelt: ein durch die LCU gespeichertes Modell kann eine Anpassung auslösen und vergrößert durch die Bereitstellung des Produktlebenslaufs die Datenbasis einer zuverlässigkeitsorientierten Datenbank. Dadurch können bestehende Zuverlässigkeitsmodelle validiert, verändert oder neue entwickelt werden. Das veränderte oder neue Zuverlässigkeitsmodell wird dann bei der Anpassung und bei der Herstellung dem angepassten bzw. neuen Produkt in der LCU gespeichert mitgegeben.



**Bild 42:** Zuverlässigkeitsmodell im LCU-Einsatz

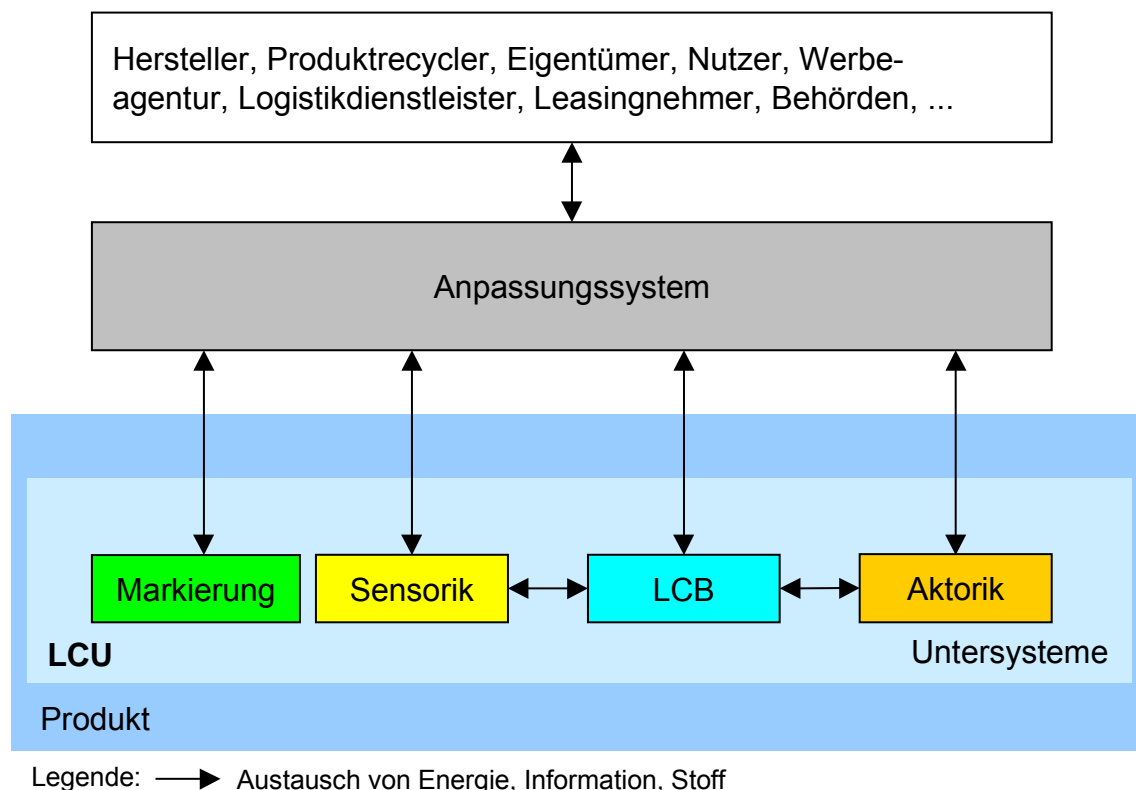
Wird eine veränderte Anforderung während der Nutzung nicht mehr erfüllt, so wird eine Anpassung notwendig. Auch das Zuverlässigkeitsmodell kann sich ändern: Wird in Lebensdauerversuchen festgestellt, dass ein Bauteil bei einer bekannten Belastung bei niedrigeren Belastungswerten versagt, als auf Basis alter Lebensdauerversuche angenommen und als Grenzwert durch die LCU gespeichert, muss das Modell verändert werden. Wird hingegen eine gänzlich neue Belastungsart festgestellt, die bisher durch das Modell gar nicht abgebildet wurde, so muss das alte durch ein neu-



es um diese Belastungsart ergänztes Zuverlässigkeitsmodell ersetzt werden. Wird hingegen das Zuverlässigkeitsmodell durch den Produktzustand validiert, so bleibt es unverändert.

### 4.3 Systemstruktur

In Bild 43 wird die Systemstruktur der LCU dargestellt. Die LCU ist im Produkt integriert. Außerhalb der LCU befindet sich das Anpassungssystem, das der Kommunikation zwischen LCU und Umgebung dient sowie während einer Anpassung alle benötigten Prozesse (Kapitel 2.2) durchführt.



**Bild 43:** Umgebungsorientierte Betrachtung der LCU

Das Anpassungssystem ist zur Durchführung aller Anpassungsarten und -prozesse mit allen hierfür benötigten Betriebsmitteln wie z.B. Demontagewerkzeugen, Bildverarbeitungssystemen oder Prüfmitteln ausgestattet. Es kann auf jedes Untersystem der LCU einzeln oder auf die Untersysteme Sensorik und Aktorik über das LCB zugreifen. Auf das Untersystem Markierung kann nicht über das LCB zugegriffen werden, da das LCB Barcodes und Farbmarkierungen weder lesen noch schreiben kann. Für beide Markierungsarten verfügt das Anpassungssystem über Bildverarbeitungssysteme zum Lesen sowie Schreibsysteme. Die erfassten Produktzustandsdaten der Sensoren können sowohl dem LCB als auch direkt dem Anpassungssystem zur Verfügung gestellt werden. Die Aktoren können ebenfalls vom LCB und auch direkt vom Anpassungssystem angesteuert werden. Das LCB dient der Kommunikation zwischen Anpassungssystem und den Untersystemen Sensorik und Aktorik so-

wie der Verarbeitung, Speicherung und Übertragung der Anpassungsdaten. Mit Hilfe der durch die LCU dem Anpassungssystem bereitgestellten Anpassungsdaten kann der Anpassungsprozess gesteuert werden.

Das Untersystem Sensorik erfasst durch im Produkt integrierte Sensoren die physischen Veränderungen und verarbeitet sie zu Produktzustandsdaten. Diese Verarbeitung kann hierbei entweder durch intelligente Sensoren oder durch nicht intelligente Sensoren mit anschließender Signalkonditionierung erfolgen. Weiterhin erfasst die LCU die veränderten Anforderungen, den Anpassungsplan und das Zuverlässigkeitsmodell des Produktes. Diese Informationsarten müssen dem Produkt in der Herstellungs- und bei Änderungen auch in der Nutzungsphase zur Verfügung gestellt werden. Ist im Produkt ein LCB integriert, so werden die veränderten Anforderungen und der Anpassungsplan durch das Interface übertragen und im Speicher des LCB gespeichert. Weist die LCU zur Speicherung nur das Untersystem Markierung auf, so müssen die Informationen bei Änderung mit Hilfe neuer Lackfarbenmarkierungen oder Barcodes gespeichert und bei Bedarf durch Bildverarbeitungssysteme gelesen werden.

Mit Hilfe von Markierungen werden von Anpassungsdaten produktbegleitend, statisch und codiert gespeichert, so dass sie mit Sensoren leichter erfasst werden können. Das LCB kann Produktzustandsdaten, veränderte Anforderungen, den Anpassungsplan und das Zuverlässigkeitsmodell zu Anpassungsdaten verarbeiten, speichern und zum Untersystem Aktorik oder zum Anpassungssystem übertragen. Kann ein LCB verwendet werden, so werden alle drei Funktionen durch dieses ausgeführt. Hierzu muss das LCB über eine Verarbeitungs-, eine Speicherungs- sowie eine Übertragungseinheit verfügen. Das beste Preis-/Leistungsverhältnis zur Realisierung dieser drei Einheiten bieten mikroelektronische Bausteine in Form eines Prozessors, Halbleiterspeichers und eines Interfacebausteins. Die Bausteine können einzeln gehäust oder in einem Gehäuse als Mikrocontroller zusammengefasst verwendet werden. Die Anpassungsdaten werden durch das LCB drahtgebunden oder drahtlos übertragen. Im zweiten Fall ist das LCB ein Transponder. Wird eine LCU ohne LCB verwendet, so können die Anpassungsdaten mit Hilfe von Markierungen produktbegleitend und im Gegensatz zu einem LCB nicht dynamisch, sondern nur statisch gespeichert werden. Die Informationen werden durch Bildverarbeitungssysteme gelesen, zum Anpassungssystem übertragen und durch dieses zu Anpassungsdaten verarbeitet. In Kapitel 5 werden mehrere realisierte LCUs mit Mikrocontrollern als LCB sowie mit Markierungen vorgestellt.

Mit Hilfe von Aktoren werden die durch das LCB bereitgestellten Anpassungsdaten mit den zwei Zielen

- Agieren entgegen der Wirkung von physischen Veränderungen und

- Demontieren durch in Verbindungselemente integrierte Aktoren umgesetzt.

Für die erste Funktion des Untersystems Aktorik wurde keine Entwicklungsarbeit geleistet, da es für die meisten Erscheinungen von physischen Veränderungen aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht zu rechtfertigen ist, diesen durch im Produkt integrierte Aktoren entgegen zu wirken. Bei diesen Erscheinungen muss bedingt durch die physische Veränderung ein Materialabtrag wieder aufgetragen werden, so dass das Material mit der entsprechenden Beschichtungstechnik im Produkt integriert werden müsste. Einzig vertretbar erscheint das Entgegenwirken den durch zu hohe Temperatur erzeugten physischen Veränderungen wie z.B. dem Verschleiß eines Lagers aufgrund eines Heißläufers. Hierbei kann das Lager mit Hilfe eines Aktors gekühlt werden. Aufgrund oben genannter Gründe wird im Rahmen der Arbeit auf die Entwicklung und Implementierung von Aktorsystemen zur Erfüllung der ersten Funktion verzichtet.

Statt dessen wurden auf Basis der Klassifizierung in Kapitel 2.6 geeignete Aktoren zur Erfüllung der zweiten Funktion des Untersystems identifiziert. Dadurch konnten mehrere Konzepte für Verbindungselemente mit integrierten Aktoren entwickelt werden, von denen ein ausgewähltes prototypisch implementiert wurde. Mit Hilfe aktori-scher Verbindungselemente wird eine selektive, sequentielle und simultane automatisierte Demontage von Komponenten und Produkten ermöglicht. Die in Kapitel 5.5 detailliert beschriebenen Verbindungselemente werden magnetostatisch geöffnet und geschlossen.

#### **4.4 Kombinationsmöglichkeiten der Untersysteme**

Die Untersysteme werden je nach Anwendungsfall zu verschiedenen LCUs modular kombiniert. Allerdings können die Untersysteme und Elemente nicht in ihrer mathematisch möglichen Anzahl zur LCU kombiniert werden; vielmehr erweisen sich aus den Funktionsanforderungen an die LCU nur bestimmte Kombinationen der Untersysteme und Elemente als geeignet für eine LCU, d.h. dass eine LCU nicht immer aus allen vier Untersystemen bestehen muss. Die LCU ist in allen vier Untersystemen skalierbar ausgeführt, d.h. dass je nach Anwendung die Elementanzahl der Untersysteme variieren kann.

In der nachfolgenden Ausarbeitung der für die LCU geeigneten Kombinationsmöglichkeiten ihrer vier Untersysteme wird das LCB gesplittet in seine drei Elemente betrachtet, da dieses technisch sinnvoll ist. So kann beispielsweise ein Sensor durch ein Digitalmultimeter ausgelesen werden; das Digitalmultimeter benötigt hierzu einen Prozessor und eine Schnittstelle zur Kommunikation, jedoch keinen Speicher. Dagegen werden die drei anderen Untersysteme nicht in ihre Elementen gesplittet betrachtet, da es technisch sinnlos ist z.B. im Fall des Untersystems Sensorik eine

mechanische Spannung nur mit dem Messfühler bestehend aus Biegebalken und DMS ohne Signalaufbereitungselektronik messen zu wollen. Zunächst werden die Kombinationsmöglichkeiten des Untersystems LCB in seine drei Elemente Prozessor, Speicher und Interface betrachtet.

Im System der LCU dient der Prozessor der Verarbeitung der Anpassungsdaten. Der Prozessor kann keine Daten speichern und benötigt ein Interface zur Kommunikation. Der Speicher kann ohne Prozessor nicht gelesen oder beschrieben werden. Das Interface dient der Übertragung von Daten zwischen LCB und Sensorik, LCB und Aktorik sowie LCB und Anpassungssystem (Bild 43). Grundsätzlich können alle drei LCB-Elemente zwischen LCU und dem Anpassungssystem geteilt werden, d.h. dass sich Prozessor, Speicher und Interface teilweise im Produkt und teilweise außerhalb des Produktes befinden können. Beispielsweise können im Produkt Informationen mit einem preisgünstigen Prozessor vorverarbeitet und als Daten in einem Speicher geringer Speichergröße gespeichert werden, bevor sie zum Empfänger des Anpassungssystems übertragen werden, wo sie zusammen mit anderen Daten durch einen leistungsfähigeren Prozessor verarbeitet und in einem größeren Speicher hinterlegt werden. Als Kriterium der Kombinationsfähigkeit der LCB-Elemente gilt, dass das Interface des LCB vorhanden sein muss, wenn Prozessor und/oder Speicher vorhanden sind, da weder Prozessor noch Speicher mit dem Produkt oder der Umgebung ohne Interface kommunizieren können. In der Kurzform wird dieses Kriterium „Interfacezwang LCB“ bezeichnet. In Tabelle 5 werden Funktionen beschrieben, die die LCU in bestimmten Kombinationen ihrer Untersysteme und Elemente des LCB erfüllen kann.

Funktion	Bedeutung	Bedingung	Beispiel
Online S/A; Online S; Online A	Die Untersysteme Sensorik (kurz „S“) und Aktorik (kurz „A“) können zwar zur Laufzeit, d.h. online betrieben werden, jedoch können weder die von einem Sensor erfassten Daten gespeichert, noch die von einem Aktor umzusetzenden Daten vom Speicher abgerufen werden, da es in dieser Kombination keinen Speicher gibt.	Untersystem Sensorik und/oder Aktorik sowie das LCB-Element Interface müssen vorhanden sein.	Auslesen eines Sensors mit externem Digitalmultimeter.  Ansteuerung eines Aktors mit externer Spannungsquelle.
Multiplex S/A; Multiplex S; Multiplex A	Der Prozessor schaltet zwischen einem Messeingang und mehreren Sensoren (kurz „S“) und/oder einem Wirkausgang und mehreren Aktoren (kurz „A“) um.	Mindestens zwei Sensoren und/oder Aktoren sowie die LCB-Elemente Prozessor und Interface müssen vorhanden sein.	Auslesen mehrerer Sensoren mit externem Digitalmultimeter.  Ansteuerung mehrerer Aktoren mit externer Spannungsquelle.

**Tabelle 5:** Funktionen der LCU in Abhängigkeit ihrer Kombination

Mit Hilfe der Funktion „Online“ kann das Untersystem Sensorik ein aktuelles Abbild des Produktzustandes erfassen und das Untersystem Aktorik einen Eingriff im Produkt durchführen. Mit Hilfe der Funktion „Multiplex“ kann das Untersystem Sensorik zwischen mehreren Sensoren und das Untersystem Aktorik zwischen mehreren Aktoren schalten. In Tabelle 6 sind die Kombinationsmöglichkeiten der LCB-Elemente dargestellt.

Nr.	Prozessor	Speicher	Interface	sinnvoll ?	Begründung Erläuterung
1	x	x	x	ja	Normalfall
2	x	x	-	nein	Interfacezwang LCB
3	x	-	x	ja	Online, Multiplex
4	x	-	-	nein	Interfacezwang LCB
5	-	x	x	nein	Speicher braucht Prozessor
6	-	x	-	nein	Interfacezwang LCB
7	-	-	x	ja	Online
8	-	-	-	ja	LCU ohne LCB, wenn LCU z.B. nur aus Untersystem Markierung besteht

x Element vorhanden  
- Element nicht vorhanden

**Tabelle 6:** Kombinationsmöglichkeiten der LCB-Elemente

Die Untersysteme Sensorik und Aktorik können vom LCB nur mit Hilfe eines Interface gelesen bzw. angesteuert werden. Aus dieser Forderung resultiert das als „Interfacezwang S/A“ bezeichnete Kriterium, das besagt, dass wenn die Untersysteme Sensorik und/oder Aktorik vorhanden sind, auch das Interface des LCB vorhanden sein muss. In den nachfolgenden zwei Tabellen sind alle mathematisch möglichen 64 Kombinationsmöglichkeiten der Untersysteme der LCU aufgeführt. Dabei wird das LCB als in seine drei Elemente gesplittet betrachtet. In Tabelle 9 werden die auf Basis der möglichen Kombinationen der LCB-Elemente aus Tabelle 6 und LCU-Funktionen aus Tabelle 5 im Sinne des LCU-Konzeptes sinnvollen Kombinationen zusammengefasst dargestellt.

Nr.	Sensorik	Markierung	LCB			Aktorik	LCU ?	Begründung/ Erläuterung
			Prozessor	Speicher	Interface			
1	x	x	x	x	x	x	ja	Vollausstattung
2	x	x	x	x	x		ja	ohne: Aktorik
3	x	x	x	x	-	x	nein	Interfacezwang LCB
4	x	x	x	x	-	-	nein	Interfacezwang LCB
5	x	x	x	-	x	x	ja	Online S/A, Multiplex S/A, statische Speicherung
6	x	x	x	-	x	-	ja	Online S, Multiplex S, statische Speicherung
7	x	x	x	-	-	x	nein	Interfacezwang LCB
8	x	x	x	-	-	-	nein	Interfacezwang LCB
9	x	x	-	x	x	x	nein	Speicher braucht Prozessor
10	x	x	-	x	x	-	nein	Speicher braucht Prozessor
11	x	x	-	x	-	x	nein	Interfacezwang LCB
12	x	x	-	x	-	-	nein	Interfacezwang LCB
13	x	x	-	-	x	x	ja	Online S/A, statische Speicherung
14	x	x	-	-	x	-	ja	Online S, statische Speicherung
15	x	x	-	-	-	x	nein	Interfacezwang S/A
16	x	x	-	-	-	-	nein	Interfacezwang S/A
17	x	-	x	x	x	x	ja	ohne: statische Speicherung
18	x	-	x	x	x	-	ja	ohne: statische Speicherung, Aktorik
19	x	-	x	x	-	x	nein	Interfacezwang LCB
20	x	-	x	x	-	-	nein	Interfacezwang LCB
21	x	-	x	-	x	x	ja	Online S/A, Multiplex S/A
22	x	-	x	-	x	-	ja	Online S, Multiplex S
23	x	-	x	-	-	x	nein	Interfacezwang LCB
24	x	-	x	-	-	-	nein	Interfacezwang LCB
25	x	-	-	x	x	x	nein	Speicher sinnlos
26	x	-	-	x	x	-	nein	Speicher sinnlos
27	x	-	-	x	-	x	nein	Interfacezwang LCB
28	x	-	-	x	-	-	nein	Interfacezwang LCB
29	x	-	-	-	x	x	ja	Online S/A
30	x	-	-	-	x	-	ja	Online S
31	x	-	-	-	-	x	nein	Interfacezwang S/A
32	x	-	-	-	-	-	nein	Interfacezwang S

S/A:

Untersystem Sensorik/Untersystem Aktorik

statische Speicherung:

Informationen können nicht dynamisch gespeichert werden

Tabelle 7:

Kombinationsmöglichkeiten der Untersysteme zur LCU (Fortsetzung in Tabelle 8)

Nr.	Sensorik	Markierung	LCB			Aktorik	LCU ?	Begründung/ Erläuterung
			Prozessor	Speicher	Interface			
33	-	x	x	x	x	x	ja	ohne: Informationserfassung
34	-	x	x	x	x	-	ja	ohne: Informationserfassung, Aktorik
35	-	x	x	x	-	x	nein	Interfacezwang LCB
36	-	x	x	x	-	-	nein	Interfacezwang LCB
37	-	x	x	-	x	x	ja	Online A, Multiplex A, statische Speicherung
38	-	x	x	-	x	-	nein	Prozessor sinnlos
39	-	x	x	-	-	x	nein	Interfacezwang LCB
40	-	x	x	-	-	-	nein	Interfacezwang LCB
41	-	x	-	x	x	x	nein	Speicher braucht Prozessor
42	-	x	-	x	x	-	nein	Speicher braucht Prozessor
43	-	x	-	x	-	x	nein	Interfacezwang LCB
44	-	x	-	x	-	-	nein	Interfacezwang LCB
45	-	x	-	-	x	x	ja	Online A, statische Speicherung
46	-	x	-	-	x	-	nein	Interface sinnlos
47	-	x	-	-	-	x	nein	Aktorik sinnlos
48	-	x	-	-	-	-	ja	Daten nur durch Markierung gespeichert
49	-	-	x	x	x	x	ja	Aktorik wird ohne Sensorinformation angesteuert
50	-	-	x	x	x	-	ja	nur Produktdatenspeicher
51	-	-	x	x	-	x	nein	Interfacezwang LCB
52	-	-	x	x	-	-	nein	Interfacezwang LCB
53	-	-	x	-	x	x	ja	Online A, Multiplex A
54	-	-	x	-	x	-	nein	beide Elemente allein sinnlos
55	-	-	x	-	-	x	nein	Interfacezwang LCB
56	-	-	x	-	-	-	nein	Interfacezwang LCB
57	-	-	-	x	x	x	nein	Speicher braucht Prozessor
58	-	-	-	x	x	-	nein	Speicher braucht Prozessor
59	-	-	-	x	-	x	nein	Speicher braucht Prozessor
60	-	-	-	x	-	-	nein	Speicher braucht Prozessor
61	-	-	-	-	x	x	ja	Online A
62	-	-	-	-	x	-	nein	Interface allein sinnlos
63	-	-	-	-	-	x	nein	Aktorik allein sinnlos
64	-	-	-	-	-	-	nein	-

S/A:

Untersystem Sensorik/Untersystem Aktorik

statische Speicherung:

Informationen können nicht dynamisch gespeichert werden

**Tabelle 8:**

Kombinationsmöglichkeiten der Untersysteme zur LCU (Fortsetzung der Tabelle 7)

Nr.	Sensorik	Markierung	LCB			Aktorik	Begründung/ Erläuterung
			Prozessor	Speicher	Interface		
1	x	x	x	x	x	x	Vollausstattung
2	x	x	x	x	x		ohne: Aktorik
5	x	x	x	-	x	x	Online S/A, Multiplex S/A, nur statische Speicherung
6	x	x	x	-	x	-	Online S, Multiplex S, nur statische Speicherung
13	x	x	-	-	x	x	Online S/A, nur statische Speicherung
14	x	x	-	-	x	-	Online S, nur statische Speicherung
17	x	-	x	x	x	x	ohne: statische Speicherung
18	x	-	x	x	x	-	Datenlogger
21	x	-	x	-	x	x	Online S/A, Multiplex S/A
22	x	-	x	-	x	-	Online S, Multiplex S
29	x	-	-	-	x	x	Online S/A
30	x	-	-	-	x	-	Online S
33	-	x	x	x	x	x	ohne: Erfassung von physischen Veränderungen
34	-	x	x	x	x	-	ohne: Erfassung von physischen Veränderungen, Aktorik
37	-	x	x	-	x	x	Online A, Multiplex A, statische Speicherung
45	-	x	-	-	x	x	Online A, statische Speicherung
48	-	x	-	-	-	-	Daten nur durch Markierung gespeichert
49	-	-	x	x	x	x	Aktorik wird ohne Sensorinformation angesteuert
50	-	-	x	x	x	-	nur Produktdatenspeicher
53	-	-	x	-	x	x	Online A, Multiplex A
61	-	-	-	-	x	x	Online A

S/A:

Untersystem Sensorik/Untersystem Aktorik

statische Speicherung:

Informationen können nicht dynamisch gespeichert werden

**Tabelle 9:** mögliche Kombinationen der LCU

Ausgehend von den 64 möglichen Kombinationsmöglichkeiten der Untersysteme mit in seine Elemente gesplittetem LCB verbleiben 21 Kombinationsmöglichkeiten, die den Kriterien einer LCU genügen. Kombination 18 entspricht einem Datenlogger, d.h. nur der Produktlebenslauf wird erfasst und gespeichert. Kombination 18 entspricht den Anwendungsfällen, wie sie in Kapitel 2.7 für die „Identification Unit“ und das „EDL“ beschrieben sind. Kombination 17 entspricht der Funktion eines Datenloggers mit aktorischer Funktion. Ein Anwendungsbeispiel stellt der seine Arbeitstemperatur regelnde Akkumulator aus Kapitel 2.7 dar. Besonders interessant für preisgünstige und einfach zu demontierende Produkte wie der Fuji Mehrwegfotoapparat aus Kapitel 2.7 ist die Kombination 48, da bei dieser der Demontageplan mit Hilfe von kostengünstigen Markierungen gespeichert werden kann. Eine LCU mit Markierungen und einem LCB mit Speicher (Kombinationen 1, 2, 33, und 34) eignen sich z.B. für nicht komplex aufgebaute Produkte und für Produkte mit kurzer Nutzungsdauer, bei denen also der Anpassungsplan klein genug für eine Speicherung mittels Markierungen ist und der zu erfassende kurze Produktlebenslauf durch einen kleinen Halbleiterspei-



cher gespeichert werden kann. Ein Beispiel stellen sensorisch überwachte Sicherheitsverbindungselemente wie die Triebwerksbolzen und die Korrosion erfassenden Schrauben in Flugzeugtragflächen aus Kapitel 2.7 dar. Die Kombinationen 5, 6, 21, 22, 37 und 53 weisen zwar einen Prozessor, aber keinen Speicher auf. Die Kombinationen mit Markierungen (5, 6, 37) können kleine Datenmengen entsprechend nicht komplexer und einfach anzupassender Produkte speichern. Alle sechs Kombinationen erlauben ferner die Multiplex-Funktion (Tabelle 5 und Tabelle 6), so dass mehrere Sensoren und/oder Aktoren ausgelesen bzw. angesteuert werden können. Ein Produktlebenslauf kann nicht gespeichert werden. Anwendungsbeispiel sind in regelmäßigen Abständen zu überprüfende eisenbahntechnische Systeme, die nicht kontinuierlich überwacht werden müssen wie beispielsweise Drehgestelle und Bremsanlagen.

Die LCU der Kombinationen 13, 14, 29, 30, 45 und 61 verfügt nur über das Element Interface, so dass die Online-Funktion (Tabelle 5 und Tabelle 6) ermöglicht wird, d.h. dass ein Sensor und ein Aktor ausgelesen bzw. angesteuert werden kann. Geeignet sind diese Kombinationen für nicht komplexe Produkte, bei denen mit Markierungen der Kombinationen 13, 14 und 45 kleine Datenmengen wie ein Demontageplan gespeichert werden können und genau ein Sensor und/oder ein Aktor benötigt werden. Ein Anwendungsbeispiel ist die Überwachung einer nicht erlaubten Gehäuseöffnung während der Garantiezeit mit einem Mikroschalter oder leitenden Draht als Sensor (Kapitel 2.4.3.3), die Überwachung der Umgebungstemperatur von gelagerten oder transportierten Frischwaren und die Kühlung eines Motorlagers eines Ventilators mit Hilfe eines fluidischen Aktors.

Die Kombination 50 besitzt nur ein LCB. Es kann somit nur dynamisch ein Anpassungsplan verarbeitet werden. Geeignet ist diese LCU für Produkte, die zwar keine Sensoren und Aktoren benötigen, deren Funktion aber hauptsächlich durch Software ermöglicht wird, die zur Funktionsänderung neu geladen werden muss. Zu nennen sind mikrocontrollergesteuerte, immer auf dem neuesten Stand der Technik zu haltenden Produkte wie Maschinensteuerungen, Steuerungen von Verbrennungsmotoren und PDAs. Sollen die Beispielprodukte der Kombination 50 eine Softwareänderung z.B. in Form einer Statusdiode anzeigen, so benötigen sie einen elektronischen Aktor. Diese Anwendung bedarf deshalb der Kombination 49.

Die Untersysteme Markierung, Sensorik und Aktorik befinden sich im/am Produkt. Diese Untersysteme können nicht außerhalb des Produktes sein, da der Produktzustand über die gesamte Lebensdauer nur durch Sensoren im/am Produkt erfasst, entgegen der Wirkung von physischen Veränderungen nur mit Aktoren im/am Produkt agiert und Daten wie z.B. der Demontageplan nur durch Markierungen am Produkt gespeichert werden können, wenn ein LCB in der LCU-Kombination nicht zur Verfügung steht.

## **4.5 Teilsysteme**

In diesem Kapitel werden unter dem besonderen Aspekt der Flussbetrachtung Umgebung, Untersysteme und Beziehungen zu den Teilsystemen Energie, Information und Stoff zusammengefasst betrachtet.

### **4.5.1 Energiefluss**

Während der Nutzung ist die LCU nicht an ein externes Energienetz gekoppelt und muss die zum eigenen Betrieb notwendige Energie selbst bereitstellen. Besteht die LCU nur aus dem Untersystem Markierung, so findet ein Energiefluss nur beim Lesen der Barcodes oder Lackfarbenmarkierungen statt. Hierbei wird die nötige Strahlungsenergie durch die Beleuchtung der Szene durch das Anpassungssystem aufgebracht. Die anderen drei Untersysteme bedürfen mindestens der Versorgung mit elektrischer Energie; das Untersystem Aktorik abhängig vom Anwendungsfall auch mit anderen Energieformen (Bild 44). Befindet sich die LCU in einem mit elektrischer Energie betriebenen Produkt, kann sie so mitversorgt werden. Andernfalls muss die LCU über Batterie, Akkumulator oder induktiv versorgt werden. Abhängig vom Anwendungsfall kommt auch eine Stromerzeugung für die LCU in Frage, z.B. bei mobilen stromlosen Produkten wie einem Güterwagen. In diesem Fall kann der Strom für die LCU beispielsweise über einen kleinen Windgenerator, Solarzellen oder Achsgenerator erzeugt werden. Die Untersysteme Sensorik und Aktorik werden vom LCB mit elektrischer Energie versorgt. Befinden sich einzelne Sensoren oder Aktoren räumlich weit vom LCB entfernt, so kann auch eine vom LCB unabhängige Stromversorgung sinnvoll sein.

Nur wenn die LCU während einer Anpassung vom Anpassungssystem mit Energie versorgt wird, können dem Untersystem Aktorik neben der elektrischen auch die anderen Energieformen für die verschiedenen Wirkprinzipien zur Verfügung gestellt werden. So kann eine Demontage mit Hilfe von Verbindungselementen mit integrierten Aktoren durchgeführt werden.

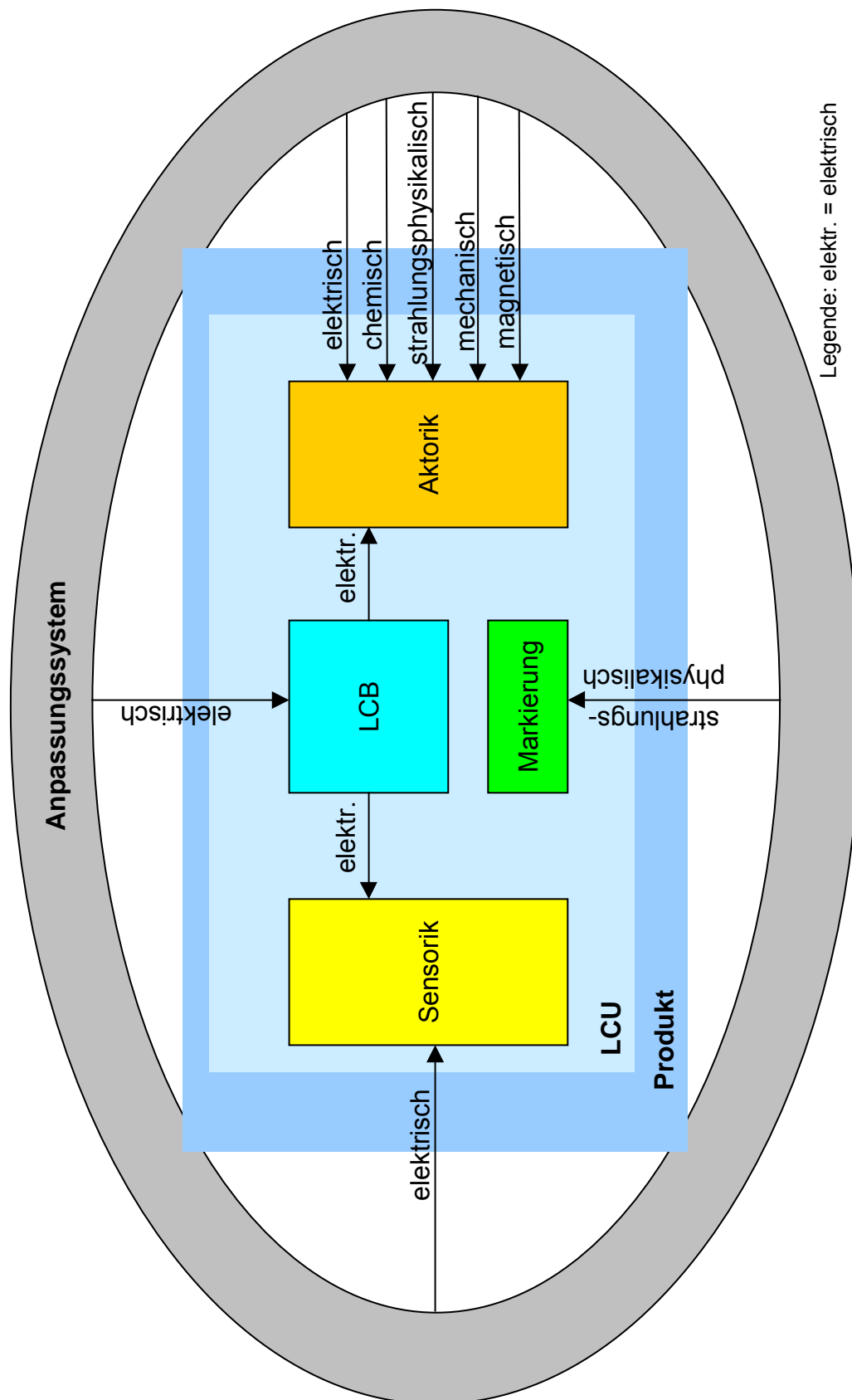
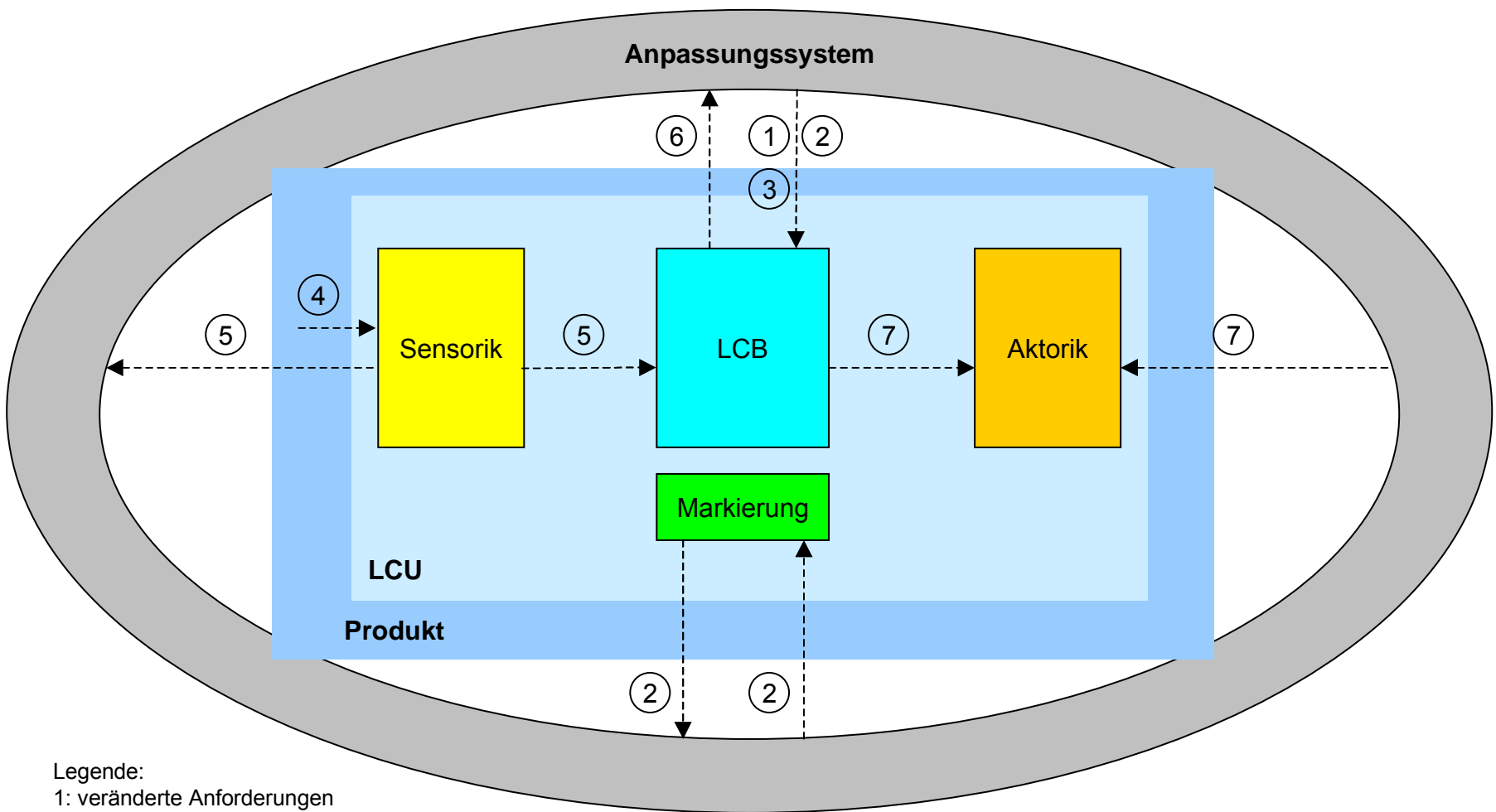


Bild 44: Energiefluss der LCU

#### **4.5.2 Informationsfluss**

Das Untersystem Sensorik erfasst die Ursachen, Wirkungen oder Erscheinungen der physischen Veränderungen und verarbeitet sie zu Produktzustandsdaten. Diese überträgt es zum LCB oder im Fall einer Anpassung zum Anpassungssystem. Das LCB verarbeitet die Produktzustandsdaten mit den während der Herstellung des Produktes gespeicherten sowie mit den während einer Anpassung aktualisierten Informationsarten „Anpassungsplan“, „veränderten Anforderungen“ und „Zuverlässigkeitsmodell“ zu den Anpassungsdaten, die auch dem Anpassungssystem zur Verfügung gestellt werden können. Das LCB nutzt diese Daten auch, um Ansteuerdaten für das Untersystem Aktorik zu generieren. Das gilt nur für diejenigen Aktoren, die ausschließlich mit elektrischer Energie arbeiten. Aktoren mit anderen Wirkenergien können nur vom Anpassungssystem versorgt werden (Bild 44). Das Anpassungssystem kann ohne Beteiligung des LCB während einer Anpassung die Aktoren ansteuern. Das Untersystem Markierung wird unabhängig von den drei anderen Untersystemen während der Herstellung beschrieben und während einer Anpassung vom Anpassungssystem gelesen und beschrieben.



Legende:

- 1: veränderte Anforderungen
- 2: Anpassungsplan
- 3: Zuverlässigkeitsmodelldaten
- 4: physische Veränderungen
- 5: Produktzustandsdaten
- 6: Anpassungsdaten
- 7: Ansteuerdaten

Bild 45:

Informationsfluss der LCU

### 4.5.3 Stofffluss

Stofffluss findet ausschließlich während einer Anpassung zwischen Anpassungssystem und Untersystem Aktorik statt. Dabei werden die Aktoren mit den jeweils zum Öffnen und Schließen der Verbindungselemente benötigten Stoffen versorgt. In Bild 46 sind Stoffe für die in Kapitel 2.6 klassifizierten Aktoren benannt. Die Aktoren leiten die verbrauchten Stoffe an das Anpassungssystem zurück. Verbraucht bedeutet, dass z.B. Druckluft beim Betrieb eines Pneumoelementes entspannt wurde. Anwendungsbeispiele der Aktoren wurden bereits in Kapitel 2.6 beschrieben.

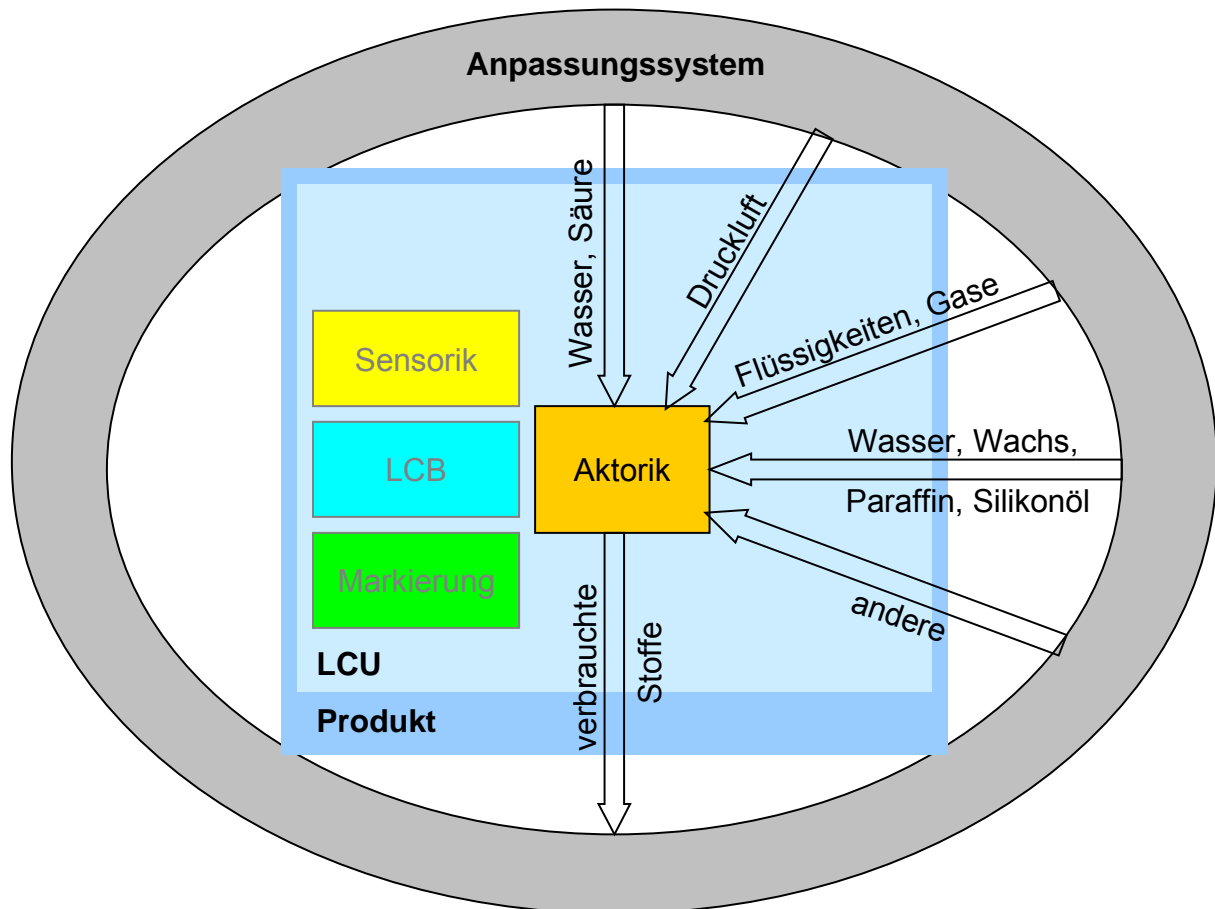


Bild 46: Stofffluss der LCU

### 4.6 Kalkulation

Die Kosten und Leistungen der LCU lassen sich zum Teil monetär bewerten, so dass es für Hersteller und Anwender der LCU möglich wird, den potenziellen Ertrag resp. Aufwand eines Produktes mit und ohne LCU abzuschätzen. Zuerst wird in den Kapiteln 4.6.1 und 4.6.2 eine Übersicht über die Kosten und Leistungen einer LCU gegeben. Als Kosten der LCU werden nur die Elementkosten betrachtet. Beispiele sind Sensoren oder Aktoren. Weiterführende Kosten wie z.B. Kosten für die Wartung eines Aktors oder Kalibrierung eines Sensors in der Produktnutzung werden nicht betrachtet. Die Leistungen einer LCU stellen ihre Dienste dar. Die monetär nicht be-

wertbaren Leistungen der LCU-Dienste werden in Kapitel 4.6.3 dargestellt. Zur beispielhaften Durchführung einer Kalkulation werden in Kapitel 4.6.4 die allgemeinen Kosten und Leistungen auf die im Kapitel 5.4 beschriebene Waschmaschine heruntergebrochen. Hierbei werden die Kosten mit Hilfe der Kapitalwertmethode und die Leistungen mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse berücksichtigt, wobei die monetär nicht bewertbaren Leistungen mit Hilfe einer Nutzwertanalyse bewertet werden. In Kapitel 4.6.5 werden die Ergebnisse zusammengeführt und zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit einer Waschmaschine mit und ohne LCU gegenübergestellt.

#### **4.6.1 Kosten**

In diesem Kapitel werden die Kosten der vier Untersysteme abgeschätzt.

##### **4.6.1.1 Sensorik**

Die Funktion „Erfassung“ wird durch Sensoren in unterschiedlicher Qualität bereitgestellt. Die Sensoren lassen sich nach ihren Messprinzipien unterteilen. Beispielsweise lässt sich Beschleunigung induktiv, kapazitiv, piezoelektrisch oder resistiv erfassen. Je nach Messprinzip ergeben sich differierende Kosten für die Herstellung der Sensoren. In der Praxis kommt nicht allen Messprinzipien die gleiche Bedeutung zu. Daher beschränkt sich diese Arbeit im Folgenden auf die in der Praxis am häufigsten anzutreffenden Messprinzipien. Durch Recherche auf dem Markt für Sensorik wurden für Sensoren Preise ermittelt und die oben erläuterten Klassen gebildet.<sup>4</sup> Verschiedene Anforderungsschwerpunkte wie z.B. Genauigkeit, Linearität und Empfindlichkeit führen zu verschiedenen Auslegungen und damit zu stark variierenden Kosten der Sensoren. Zur Bestimmung der Kosten für eine LCU wird eine am Sensormarkt orientierte Klassifizierung vorgenommen. Sinnvoll erscheint eine Aufteilung in folgende Sensor-Klassen:

- Sensor-Klasse 1: Diese preisgünstigsten Sensoren erfüllen die Anforderungen in ausreichender Art und Weise.
- Sensor-Klasse 2: Die Erfüllungsgrade der Anforderungen und Preise dieser Sensoren nehmen eine mittlere Position ein.
- Sensor-Klasse 3: Sensoren dieser Klasse sind Referenzbauteile, die höchste Leistungsfähigkeit zu höchsten Preisen bieten.

Tabelle 10 und Tabelle 11 stellen die ausgewählten Sensortypen mit ihren jeweiligen Messprinzipien und den für die jeweiligen Klassen ermittelten Preisen dar.

---

<sup>4</sup> Preislisten, Produktkataloge und telefonische Auskünfte im Mai/Juni 2001 folgender Hersteller und Händler von Sensoren: AMOS; AHLBORN; ALTHEN; BURSTER; CONRAD; CMV; DISYNET; ENDEVCO; HBM; JMS; KISTLER; ME; SYNOTECH; THERMOCOAX.

Sensorarten und deren Wirkprinzipien		Hersteller und Händler	Preise in Sensor-Klasse 1		Preise in Sensor-Klasse 2		Preise in Sensor-Klasse 3	
			von	bis	von	bis	von	bis
Beschleunigung								
resistiv	piezoresistiv	AMOS	501 €	716 €			1.478 €	1.821 €
resistiv	piezoresistiv	DISYNET	200 €	400 €				2.000 €
resistiv	piezoresistiv	ENDEVCO	497 €		1.534 €			3.774 €
piezoelektrisch		ENDEVCO	409 €		1.278 €			4.226 €
piezoelektrisch		KISTLER	342 €		936 €	1.769 €		2.484 €
induktiv		HBM			760 €	840 €		
kapazitiv		AMOS	235 €	864 €				
kapazitiv		KISTLER	409 €	547 €			1.595 €	1.794 €
kapazitiv		SYNOTECH			685 €	1.084 €		
Dehnung								
resistiv	DMS-Basis	HBM	4 €	16 €	60 €	205 €		
piezoelektrisch		KISTLER					353 €	936 €
Drehmoment								
resistiv	DMS-Basis	BURSTER	640 €			3.800 €		
resistiv	DMS-Basis	HBM			1.746 €	4.445 €	5.359 €	11.352 €
Druck								
resistiv	DMS-Basis	AMOS	102 €		435 €	997 €		
resistiv	DMS-Basis	BURSTER			475 €			1.640 €
resistiv	DMS-Basis	DISYNET	146 €	240 €	375 €	689 €		1.100 €
resistiv	DMS-Basis	HBM	220 €	261 €	578 €	706 €		1.095 €
resistiv	piezoresistiv	KISTLER			706 €	808 €		1.784 €
kapazitiv		HBM			711 €			
piezoelektrisch		KISTLER			506 €		1.048 €	3.323 €
Durchfluss								
Wirkdruckprinzip		DISYNET			543 €			
Turbinenzähler		AHLBORN	205 €					708 €
Feuchte								
kapazitiv		AHLBORN	180 €		230 €	357 €	601 €	882 €
hygroskopische Kunststofffolie		AHLBORN			297 €	356 €		
Kraft								
resistiv	DMS-Basis	ALTHEN	404 €		1.140 €		2.260 €	
resistiv	DMS-Basis	AMOS	307 €	997 €	1.202 €	2.045 €	3.477 €	5.266 €
resistiv	DMS-Basis	CMV	286 €					5.351 €
resistiv	DMS-Basis	DISYNET	400 €	700 €				26.000 €
resistiv	DMS-Basis	HBM	353 €	696 €		1.054 €	2.280 €	7.520 €
resistiv	DMS-Basis	ME	122 €	665 €				
magnetoelastisch		ME		895 €		1.227 €		
piezoelektrisch		KISTLER	460 €	992 €				4.586 €

Tabelle 10: Übersicht Sensorpreise (Teil 1)



Sensorarten und deren Wirkprinzipien	Hersteller	Preise in Sensor-Klasse 1 von bis	Preise in Sensor-Klasse 2 von bis	Preise in Sensor-Klasse 3 von bis
<b>Länge (Weg)</b>				
resistiv potentiometrisch	BURSTER	110 € 150 €	167 €	980 €
induktiv	BURSTER		305 € 430 €	600 €
induktiv	HBM		225 €	670 €
<b>ph-Wert</b>				
resistiv potentiometrisch	AHLBORN		87 € 125 €	
<b>Rauch/Brand</b>				
optoelektronisch	CONRAD	41 €		
fotoelektronisch	CONRAD	31 € 41 €		
<b>Temperatur</b>				
thermoelektrisch Thermoelemente	AHLBORN	26 €	77 € 196 €	
Thermoelemente	JMS	9 €	30 € 266 €	
Thermoelemente	THERMOCOAX		64 €	
Thermoelemente	CONRAD	1 € 11 €		
resistiv Widerstandsthermometer	BURSTER		122 € 530 €	2.440 € 4.140 €
Infrarot-Thermometer	AHLBORN		127 € 256 €	843 €
<b>Winkel (Weg)</b>				
resistiv potentiometrisch	BURSTER	144 €		
kapazitiv	BURSTER			915 € 1.250 €
digitale Winkelsensoren	BURSTER		200 €	

Tabelle 11: Übersicht Sensorpreise (Teil 2)

Durch Mittelwertbildung der Preise der Sensor-Klassen sowie einer nachfolgenden Komprimierung unter Vernachlässigung der Messprinzipien und erneute Mittelwertbildung der Preise für jeden Sensortyp je Klasse ergibt sich in Tabelle 12 ein Preis pro Sensorart und Sensorklasse.

Sensorarten	durchschnittlicher Preis* in Sensor-klasse 1	durchschnittlicher Preis* in Sensor-klasse 2	durchschnittlicher Preis* in Sensor-klasse 3
<b>Beschleunigung</b>	450 €	1.250 €	2.500 €
<b>Dehnung</b>	10 €	150 €	650 €
<b>Drehmoment</b>	650 €	3.500 €	8.500 €
<b>Druck</b>	200 €	650 €	1.750 €
<b>Durchfluss</b>	200 €	550 €	700 €
<b>Feuchte</b>	200 €	300 €	750 €
<b>Kraft</b>	700 €	1.250 €	6.000 €
<b>Länge (Weg)</b>	150 €	250 €	800 €
<b>ph-Wert</b>		100 €	
<b>Rauch</b>	50 €		
<b>Temperatur</b>	10 €	200 €	2.000 €
<b>Winkel (Weg)</b>	150 €	200 €	1.000 €

\* alle Preise gerundet

Tabelle 12: Durchschnittliche Preise pro Sensorart und Sensorklasse

Es kann festgestellt werden, dass moderne Sensoren in zunehmendem Maße mit Methoden und zu den Kosten der Mikroelektronik hergestellt werden. Die Kosten ei-

nes einzelnen ICs werden primär durch die beiden Faktoren Entwicklungszeit und Stückzahl bestimmt. Deshalb ist bei der Massenanwendung in durch die LCU ermöglichten und generierten Geschäftsfeldern von mikroelektronisch integrierbaren Sensoren die gleiche Preisentwicklung wie bei Bauteilen der Mikroelektronik zu erwarten. Die hier zugrunde gelegten Sensorpreise sind demnach - bedingt durch zu wenige Anwendungen und somit geringe Stückzahlen - als noch zu hoch zu betrachten.

#### 4.6.1.2 Markierung

Die Kosten für Barcodes und Lackfarbenmarkierungen haben den geringsten Einfluss auf die Gesamtkosten der LCU. Gelesen werden die gespeicherten Informationen durch Bildverarbeitungssysteme, bestehend aus Beleuchtung der Szene, CCD-Kamera und Bildverarbeitungssoftware. Die Kosten für eine einzelne Markierung sind bei den für Konsumgüter der Massenproduktion üblichen Stückzahlen gering. So ist es bei Barcodes kaum möglich, einen sinnvollen Preis für eine einzelne Markierung anzugeben. Lediglich die Fixkosten für die anfängliche Erstellung des Barcodes verursachen hohe Anfangsinvestitionen. Durch Fixkostendegression bei hohen Stückzahlen ergeben sich geringe Stückkosten für die Herstellung eines Barcodes.

Als Orientierungshilfe wurde ein mittlerer Preis für einen zweidimensionalen Barcode zwischen 0,04 bis 0,10 Euro [DVZ-99] ermittelt. Ein realistischer Preis für Lackfarbenmarkierungen konnte nicht ermittelt werden. Für die Kalkulation in Kapitel 4.6.4 wurde in dieser Arbeit von einem Preis von 0,01€ ausgegangen. Bedenkt man, dass alle Lackfarbenmarkierungen und Barcodes schon zum Zeitpunkt der Herstellung eines Produktes angebracht werden, so ist in der Realität von keinem Mehraufwand für Markierungen auszugehen.

#### 4.6.1.3 LCB

Das LCB besteht aus den drei Elementen Mikroprozessor, Speicher und Schnittstelle. Allgemein kostet ein aus Standard-ICs aufgebautes LCB mehr als ein ASIC-LCB, da sich bei den erwarteten großen Stückzahlen ein anwendungsspezifischer Entwurf lohnt.

ASIC - Entwurstil	Stückkosten [€] (Stückzahl: 100.000)
Full-Custom	8,19
Standard-Zelle	7,76
Makro-Zelle	7,46
Gate-Array	15,05
FPGA	56,76

Tabelle 13: ASIC-Stückkosten

In Tabelle 13 sind auf Basis des Kapitels 2.5.1 die Kosten eines ASIC-LCB mit 20.000 Gatteräquivalenten für eine Stückzahl von 100.000 aufgelistet. Vor- und Nachteile der Entwurststile hängen stark von den konkreten Bedingungen eines ASIC-Projektes ab. Daher lässt sich nicht, wie bei den Sensoren, eine Klassifizierung aufgrund unterschiedlicher Qualitätsstufen vornehmen. Für die weiteren Berechnungen wird ein Mittelwert über alle Entwurststile gebildet. Als durchschnittlicher Preis für einen Mikrocontroller ergibt sich ein Betrag von 19 € (aufgerundet).

Das LCB enthält zunächst einen Mikroprozessor, Speicher und eine Schnittstelle. Dabei handelt es sich um Standard-Bauteile. Für einige Anwendungsfälle der LCU kann es sinnvoll sein, diese Standard-Bauteile quantitativ z.B. durch mehr Speicherkapazität für eine längere Speicherung des Produktlebenslaufs zu ergänzen. Daher werden die Kosten für verschiedene Speicherarten betrachtet. Die Preise für D- und S-RAM-Speicherchips haben sich in den letzten Jahren einander angenähert, während EPROM- und vor allem EEPROM-Speicherbauteile deutlich teurer sind.

Für die Abschätzung der Kosten des Speichers ist in erster Linie einzelfallspezifisch zu prüfen, ob flüchtige oder nichtflüchtige Speicherbauteile benötigt werden. Außerdem sind die Kosten für Speicher von der Speicherkapazität abhängig. Die Geschwindigkeit der Speicherbauteile (Zugriffszeit) spielt nur eine untergeordnete Rolle, da auch längere Zugriffszeiten von EPROMs für die Einsatzgebiete der LCU ausreichend sind. Die Preise der vier Speicherarten wurden durch eine Marktanalyse nach Preisangaben verschiedener Speicherhersteller bestimmt. Es werden die in Tabelle 14 dargestellten durchschnittlichen Preise angenommen.

Speichertyp (256 K)		Zugriffszeit	Durchschnittspreis
PROM:	EPROM	250 ns	4,50 €
	EEPROM	150 ns	11,50 €
RAM:	D-RAM	150 ns	3,00 €
	S-RAM	15 ns	4,00 €

Tabelle 14: Preise für Speicherbausteine

Die Preise für Bausteine mit einer größeren Speicherkapazität können als Vielfache von 256 K überschlägig durch Multiplikation der angegebenen Preise bestimmt werden. Weiterer Bestandteil des LCB ist die Schnittstelle (Interface), welche ebenso wie das standardmäßige Speicherbauteil im bereits beschriebenen Mikrocontroller integriert ist. Im Gegensatz zum Speicher ist eine Erweiterung der im LCB vorhandenen Schnittstelle um weitere Schnittstellenarten nicht vorgesehen. Deshalb wird hier auf die Kosten von Schnittstellen nicht weiter eingegangen. Bei einem Transponder ist die Schnittstelle als Funkschnittstelle ausgeführt. Schreib-/Lese-Antennen können drahtlos über Entfernungen von einigen Metern auf dem Transponder gespeicherte Daten lesen oder neue Daten speichern. Die Kosten für Transponder sind stark von

den benötigten Stückzahlen abhängig. Ein einzelner Transponderchip kann bis zu 20 € kosten<sup>5</sup>, größere Stückzahlen sind schon für 2 €<sup>6</sup> erhältlich. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das LCB zur Informationsverarbeitung bei entsprechend hohen Stückzahlen keinen bestimmenden Anteil an den Gesamtkosten der LCU erreichen wird, der bereits mit heutigen Verfahren der Mikroelektronikherstellung für kleine bis mittlere Anwendungen im einstelligen Euro-Bereich liegen wird.

#### 4.6.1.4 Aktorik

Bei Aktoren ergibt sich, ähnlich wie bei Sensoren, eine weite Preisspanne. Erschwerend kommt hinzu, dass bisher kein spezieller Markt für Aktoren, wie sie im Sinne der Arbeit verwendet werden, existiert. Daher gibt es auch keinen Richtpreis, der beispielsweise für einen magnetischen Aktor angesetzt werden könnte. Im Rahmen dieser Arbeit wird erneut eine Klassifizierung durchgeführt. Für die Klassen werden anhand von Richtpreisen grobe Preisangaben gemacht.

Aktor-Klasse 1: Aktoren der Aktor-Klasse 1 stellen die preisgünstigste Möglichkeit zur Realisierung eines Aktors dar.

Aktor-Klasse 2: Ein Aktor der Aktor-Klasse 2 ist preislich im mittleren Bereich angesiedelt.

Aktor-Klasse 3: Aktoren der Aktor-Klasse 3 bestehen aus Bauteilen hoher Präzision und Qualität, deren Preise im obersten Bereich liegen.

Die in Tabelle 15 dargestellten durchschnittlichen Preise wurden für Aktoren der Klassen 1 bis 3 anhand von Preislisten verschiedener Hersteller ermittelt.<sup>7,8</sup>

	Aktor-Klasse 1	Aktor-Klasse 2	Aktor-Klasse 3
Durchschnittspreis	< 10 €	10 € - 50 €	> 50 €

**Tabelle 15:** Aktorpreise

Beispiele für Aktoren der Klasse 1 sind Permanentmagnete (0,30 bis 0,70 €) oder Kühlelemente bestehend aus einem Miniatlüfter (je nach Ausführung und Qualität: 5 € bis 15 €). Metallische Werkstoffe mit Formgedächtniseffekt kosten pro Gramm 0,02 € (NiTi) bis 0,04 € (CuZnAl) und sind daher auch in größeren Mengen noch der Klasse 1 zuzuordnen [JAN-92]. Ein Peltier-Element, das je nach Wärmeleistung zwischen 10 € und 50 € kostet, stellt einen Aktor der Klasse 2 dar. Auch bei Relais variieren die Preise stark, so dass ein kostengünstiges elektromagnetisches Leistungsrelais, wie es in Kraftfahrzeugen verbaut wird, weniger als 3 € kostet (Klasse 1), während ein elektronisches Lastrelais um 30 € kostet (Klasse 2). Spezialbausteine, wie

<sup>5</sup> Angebot für Transponder MOBY E vom 17.05.01. der SIEMENS AG.

<sup>6</sup> Angebot für Transponder Gemplus C240 vom 17.05.01 der Gesellschaft für Informatik und Steuerungstechnik GiS mbH, 2001.

<sup>7</sup> Die ganze Elektronik. Hauptkatalog 2001. BÜRKLIN GmbH, 2001.

<sup>8</sup> Hauptkatalog 2001. CONRAD ELECTRONIC GmbH, 2001.

z.B. ein IGBT, liegen im Bereich von über 100 € (Klasse 3). Zu Aktoren der Klasse 3 ist zum Beispiel auch ein präziser Stellmotor zu zählen, der in Verbindung mit einem Getriebe im Bereich von 200 € und darüber liegt.<sup>9,10</sup>

#### **4.6.2 LCU-Dienste**

Auf Basis der bereitgestellten Anpassungsdaten bietet die LCU die vier Dienste Anpassungsdaten, Qualitätssicherung, Beweislastsicherung und Added Value zur Leistungserstellung an. In der Tabelle 16 sind die Leistungen der LCU untergliedert nach ihren Diensten zusammenfassend aufgelistet. Die Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr stellt sie eine Basis für das vielfältige Leistungsfeld einer LCU dar.

##### **4.6.2.1 Anpassungsdaten**

Zur bedarfs- und zeitpunktgerechten Durchführung der Anpassung stellen die durch die LCU bereitgestellten Anpassungsdaten die Grundlage von Anpassungsprozessen dar. Die im Rahmen dieses Dienstes bereitgestellten Anpassungsdaten bilden die Datengrundlage zur Erfüllung der weiteren drei Dienste.

##### **4.6.2.2 Qualitätssicherung**

Informationen aus der Produktnutzung können zur Qualitätssicherung (QS) von Produkten vor, während und nach Ende einer Nutzungsphase verwendet werden. Mit den heute während der Nutzungsphase zur Verfügung stehenden Mitteln nehmen die Einflussmöglichkeiten durch QS-Maßnahmen entlang der Wertschöpfungskette ab. Durch eine Erweiterung der heute bereits im Zeitraum zwischen Produktidee und Serienfertigung angewandten QS-Instrumente Failure Tree Analysis (FTA), Design of Experiments (DOE), Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), Quality Function Deployment (QFD) und Statistical Process Control (SPC) auf die Nutzungsphase eines Produkts vergrößert sich das Spektrum der QS-Einflussmöglichkeiten deutlich [GRU-00]. Am Beispiel der FMEA soll die Anwendung von QS-Instrumenten während der Nutzungsphase erläutert werden: Mit Hilfe einer FMEA werden heute Fehlermöglichkeiten und deren denkbare Auswirkungen in der Entwicklung von Systemen, der Konstruktion von Komponenten oder der Auslegung von Fertigungsprozessen analysiert. Alle wesentlichen Fehler sollen frühestmöglich mit geringem Aufwand hinsichtlich ihrer Auftrittswahrscheinlichkeit, Bedeutung und Entdeckungswahrscheinlichkeit von Experten bewertet werden. Aus dem Produkt dieser einzelnen Bewertungen ergibt sich die Risikoprioritätszahl. Beim Überschreiten eines vom Expertenteam festgelegten Grenzwerts werden entsprechende Verbesserungsmaßnahmen eingeleitet. Die FMEA hat folglich die Aufgabe zu hinterfragen, welche Qualität während der

---

<sup>9</sup> Die ganze Elektronik. Hauptkatalog 2001. BÜRKLIN GmbH, 2001.

<sup>10</sup> Hauptkatalog 2001. CONRAD ELECTRONIC GmbH, 2001.

Entwicklungs- und Planungsphase vorhanden ist. Wären Informationen aus der individuellen Produktnutzung, d.h. über Kundenpräferenzen und Produktzustand verfügbar, so wäre die Qualität einer Anpassung wie z.B. einer Instandhaltung an die Präferenzen des Nutzers adaptierbar. Hierfür ist eine Erweiterung der FMEA auf die Nutzungsphase erforderlich. Benötigt werden Informationen darüber, welche Bedeutung ein Fehler für einen Kunden haben kann. Diese lassen sich in quantifizierter Form mit Hilfe der LCU aus der Nutzung des Produktes ableiten. Das Nutzungsprofil leitet das LCB aus dem Produktlebenslauf ab. Nutzt ein Kunde ein Produkt häufig und intensiv, so ist die Bedeutung eines Ausfalls für den Kunden höher einzuschätzen, als wenn das Produkt nur selten bzw. unter geringer Belastung eingesetzt wird. Je nach Nutzungsprofil können Instandhaltungsmaßnahmen nach Feststellung eines bestimmten Abnutzungsniveaus entweder vorgezogen oder verzögert werden.

#### **4.6.2.3 Beweislastsicherung**

Das Vermeiden von Produktschäden allgemein und insbesondere von solchen, die zu Schadenersatzklagen aufgrund von Sach- und Personenschäden führen können, ist ein wichtiges Ziel einer Unternehmung. Das Hauptaugenmerk zur Absicherung gegenüber Schadenersatzklagen liegt auf einer umsichtigen Entwicklung, Konstruktion und Herstellung von Produkten unter Beachtung der weltweit bestehenden Regeln der Technik. Während der Nutzungsphase gewinnt die Auswertung und Ursachenanalyse aller Berichte über Schäden, wie z.B. Gewährleistungsfälle, Kulanzleistungen, Reparatüreinsätze und Unfallstatistiken eine große Bedeutung. Die LCU kann hierbei durch Bereitstellung des Produktlebenslaufs einen wichtigen Beitrag bei der Dokumentation von Nutzungsdaten, der optimierten Instruktion, der aktiven Produktbeobachtung und einer dadurch ermöglichten Abwendung von Schäden leisten. Weiterhin ermöglicht dieser Dienst die Dokumentation der QS in der Herstellung. Durch Bereitstellung vieler Produktlebensläufe von mit LCUs ausgestatteten Produkten in Datenbanken können sich die Interessengruppen vergewissern, ob sie sich hinsichtlich Haftungsansprüchen im legalen Rahmen befinden. Hierzu werden die nach Produktart und -typ aggregierten Produktlebensläufe mit folgenden in Datenbanken organisierten Informationen verglichen: Vergleichbare bzw. gleiche frühere Schadensfälle, Stand der Technik, Komplementärprodukte, Reklamationen (passive Produktbeobachtung), Informationen aktiver Produktbeobachtung, Normenkonformität und CE-Konformität.

Dieser Dienst stellt die Daten zur Beantwortung folgender Fragen bereit:

- Werden Produkte in Länder exportiert, in denen ein großes Produkthaftungsrisiko vorherrscht?
- Besteht die begründete Gefahr des vorsätzlichen oder fahrlässigen Produktmissbrauchs?

- Werden Produkte ohne Kontrolle an Dritte weitergegeben, und ergeben sich hieraus Risiken?
- Wie hoch ist das Kostenrisiko aus der Höhe der Folgeschäden aus Konstruktions-, Fertigungs- oder Instruktionsfehlern?

Hersteller und Exporteure kommen somit ihren Produktbeobachtungspflichten nach, können Instruktionen zur Nutzung der bereits vertriebenen Produkte modifizieren und gleichzeitig Nutzungsdaten zwecks Beweislastsicherung speichern. Auch Nutzer oder Eigentümer können diese Daten zur eigenen Beweislastsicherung anwenden.

#### **4.6.2.4 Added Value**

Mit diesem Dienst können LCU-Daten für ein breites Spektrum an Aufgaben und Interessenten bereitgestellt werden. Anwendungen finden sich beispielsweise in der Produktionsplanung, Logistik, im Marketing, im Vertrieb und im Kundenservice. So bedarf die Planung eines auf der Wiederverwendung von Baugruppen basierenden Ersatzteilmanagements weitreichender Informationen über Art, Anzahl, Zustand und Ort der sich im Umlauf befindenden Produkte. Mit Hilfe der Stammdaten eines Produktes wie z.B. Gewicht und Abmessungen kann der Transport zum Nutzer oder zur Anpassung geplant werden.

Werden wiederverwendete Baugruppen auch in Neuprodukten verbaut, so sind diese Informationen auch für die Produktionsplanung von hoher Bedeutung. Im Bereich des Kundenservice können Bedienungsanleitungen, Software-Updates oder auch Gefahrenhinweise dem Nutzer schneller und sicherer bereitgestellt werden. Mit spezifischen Nutzungsinformationen, die z.B. Nutzer gegen Vergütung zur Verfügung stellen, sind gezielte Marktstudien und hierauf aufbauend angepasste Vertriebsstrategien und Produktneuplanungen möglich.

Tabelle 16:

Leistungen einer LCU

Dienst	Bereich	Leistung
Added Value	Marketing, Logistik und Vertrieb	<ul style="list-style-type: none"> <li>- verbesserte Preisbildung, Auftragsplanung und -steuerung mit Kundenstammdaten</li> <li>- Zuliefernetzwerke zwischen Komponenten- oder Systemlieferanten und Endhersteller</li> <li>- Verbesserung des Vertriebs und der Logistik durch Nutzungsprofile und Produktlebenslaufdaten</li> <li>- Anpassung der Produktpalette und Produktmerkmale an Kundenwünsche</li> </ul>
	Unfälle	<ul style="list-style-type: none"> <li>- reduzierte Unfallgefahr durch Produktzustandsüberwachung</li> <li>- Senkung der Unfallfolgekosten durch Überwachung sicherheitsrelevanter Verbindungselemente</li> </ul>
Anpassungsdaten	zeitwertgerechte Instandhaltung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bauteile werden erst am Ende ihrer Lebensdauer getauscht</li> <li>- kein Austausch funktionstüchtiger Bauteile aufgrund starrer Wartungsintervalle</li> </ul>
	Totalausfälle	keine oder weniger Totalausfälle des Produkts, da kritische Bauteile rechtzeitig angepasst werden
	Demontage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verbindungselemente mit integrierten Aktoren ermöglichen eine automatisierte Demontage</li> <li>- Kostenersparnis gegenüber manueller Demontage</li> </ul>
	Produktlebensdauer	Verlängerung der Lebensdauer durch Aktoren, die entgegen der Wirkung von physischen Veränderungen agieren
	Fehlerdiagnose	<ul style="list-style-type: none"> <li>- schnelle und eindeutige Fehlerdiagnose</li> <li>- Entfall vorsätzlicher oder unbeabsichtigter Fehldiagnosen</li> </ul>
	Neukauf	späterer Neukauf durch optimierte Instandhaltung
Beweislastsicherung	Bewältigung der Beweislastproblematik in Schadensfällen	Durch Bereitstellung von Produktzustand, Produktlebenslauf, einer quittierbaren Bedienungsanleitung sowie der Dokumentation der Qualitätssicherung während der Herstellung wird eine objektive, integre Datenbasis zur Absicherung gegenüber Ansprüchen aus deliktischer, verschuldensunabhängiger und vertraglicher Haftung geschaffen.
Qualitätssicherung	Neuprodukt	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verbesserung von Zuverlässigkeitsmodellen mit Nutzerprofilen und Lebenslaufdaten</li> <li>- verbesserte Neuprodukte durch tatsächliche Nutzungs- und Abnutzungsdaten alter Produkte</li> </ul>
	Qualitätssicherung	Verbesserte Qualitätssicherung von genutzten und zukünftigen Produkten durch größere Datenbasis bestehend aus Produktlebenslaufdaten und Nutzerprofilen.
	Verkauf	von Schadensfall- und Produktlebenslaufdaten an Eigentümer, Hersteller und Produktrecycler



### 4.6.3 Monetär nicht bewertbare Leistungen

Neben den in Tabelle 16 beschriebenen Leistungen bietet die LCU auch Leistungen an, die monetär nicht bewertet werden können. Deshalb wird nicht ein quantitatives Investitionsrechnungsverfahren, sondern die Nutzwertanalyse als qualitatives Bewertungsverfahren im Rahmen der Kalkulation eingesetzt. In Tabelle 17 sind Beispiele für monetär nicht bewertbare Leistungen aufgelistet. Nicht alle Leistungen aus Tabelle 16 können vollständig monetär bewertet werden, sondern bestehen aus einem monetär bewertbaren und nicht bewertbaren Anteil: Beispielsweise kann der Beitrag des LCU-Dienstes Beweislastsicherung aufgrund bekannter Schadensfälle mit Hilfe der hierbei festgesetzten Schadensersatzansprüche beziffert werden. Darüber hinaus gehende Auswirkungen auf ein sinkendes oder steigendes Klagepotential der Nutzer können nicht monetär beziffert werden. Gleichwohl kann der Objektivierung der Beweislastsicherung durch Bereitstellung des Produktlebenslaufs ein positiver Effekt zugeschrieben werden. Aus diesem Grund können auch monetär bewertbare Leistungen einer Nutzwertanalyse unterzogen werden.

Leistung	Beschreibung
Image-Vorteile beim Kunden durch	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hohe, konstante Produktqualität, geringe Nacharbeits- und Rückrufquote sowie weniger Haftungs- und Produkthaftungsklagen,</li> <li>- zuverlässige Lieferfristen aufgrund geringer Ausfallquote der Produktionsanlagen,</li> <li>- umweltfreundliche Produkte aufgrund der Möglichkeit der Anpassung während und der Entsorgung nach einer Nutzungsphase,</li> <li>- bessere Erfüllung der Kundenwünsche</li> <li>- geringere Umweltbelastung durch ressourcenschonende Produkte und intelligente Demontage</li> </ul>
verbessertes Neuprodukt	aufgrund bereitgestellter Produktlebenslaufdaten, Nutzerprofile, Schadensdaten und Auswertung von Reklamationen
verbessertes Marketing	durch Bereitstellung von Nutzerprofilen und Schadensdaten.
Reduzierung des Schadensersatzrisikos	durch Bewältigung der Beweislastproblematik.

Tabelle 17: Beispiele für monetär nicht bewertbare Leistungen

### 4.6.4 Waschmaschine

Für die mit einer LCU ausgestattete Waschmaschine aus Kapitel 5.4 wird eine Kalkulation durchgeführt. Die Waschmaschine ist als typisches Konsumgut der Massenproduktion ein gut geeignetes Anwendungsfeld für die LCU.

#### 4.6.4.1 Kosten

In heutigen Waschmaschinen wird die Drehzahl der Trommel zum Zweck der Regelung der Schleuderdrehzahl bereits gemessen. Daher ist für die Drehzahlmessung keine zusätzliche Sensorik erforderlich. Die Erfassung der Schaltspiele der beiden

Magnetventile erfolgt elektronisch mit Hilfe der Ansteuersignale der bereits vorhandenen Waschmaschinenelektronik, die durch entsprechende Programmierung des LCBs aufgezeichnet und verarbeitet werden können. Zusätzliche Materialkosten entstehen nicht. Zusätzliche Kosten fallen jedoch zur Bestimmung von Temperaturen an. Zwar verfügt die Waschmaschine bereits über ein Thermostat zur Regelung der Wassertemperatur in der Trommel, jedoch ist zur Erfassung des Abnutzungsgrades und zur Fehlerdiagnose des Motorlagers zusätzlich die Bestimmung der Temperaturen an Antriebsmotor und Heizstab sinnvoll. Als Markierungen sollen im Beispielprodukt Waschmaschine Lackfarbenmarkierungen zum Einsatz kommen, die eine vollautomatisiert durchgeführte maschinelle Demontage des Gehäuses ermöglichen. Für die Investitionsrechnung wird von 30 Markierungen an den Verbindungselementen der Waschmaschine ausgegangen. Als LCB wird im Beispielprodukt Waschmaschine ein Mikrocontroller verwendet. Dieser enthält also bereits Mikroprozessor, Speicher und Schnittstelle. Dennoch wird zusätzlich zum bereits vorhandenen Speicher die Speicherkapazität erweitert, um die durch die Sensorik aufgenommenen Daten über einen längeren Zeitraum speichern zu können. Zur Anwendung kommen dabei EEPROMs mit insgesamt 1.024 K Speicherkapazität. Als Aktoren werden 16 in Verbindungselemente integrierte Permanentmagnete verwendet. Sie stellen eine kostengünstige Möglichkeit dar, um Verbindungen herzustellen, die zerstörungsfrei wiederholbar gelöst werden können. Bewertet mit den in den Kapiteln 4.6.1.1 bis 4.6.1.4 ermittelten Kosten ergeben sich die Gesamtkosten in Tabelle 18:

Untersystem	Komponenten	Anzahl	Kosten
Sensorik (Sensor-Klasse 1)	Erfassung der Nutzungsdauern der Waschmaschine und des Heizstabs (über Waschmaschinenelektronik)	1	--
	Erfassung der Schaltspielanzahl des Magnetventils (über Waschmaschinenelektronik)	1	--
	Sensor für Drehzahl	1	--
	Sensor für Temperatur des Heizstabs	1	10,00 €
	Sensor für Temperatur im Lager des Antriebsmotors	1	10,00 €
Markierung	Barcode	1	0,05 €
	Lackfarbenmarkierung	30	0,30 €
LCB	Mikrocontroller	1	19,00 €
	EEPROM-Speicher (256 K)	4	46,00 €
Aktorik (Aktor-Klasse 1)	Permanentmagnet	16	8,00 €
<b>Gesamtkosten</b>			<b>93,35 €</b>

Tabelle 18: Gesamtkosten der Waschmaschinen-LCU

#### 4.6.4.2 Leistungen

Nicht jede in Kapitel 4.6.2 aufgezeigte Leistung tritt beim Einsatz der LCU im Beispielprodukt Waschmaschine auf. Es werden nur die Leistungen ausgewählt, die im Beispielprodukt Waschmaschine relevant erscheinen:

Diese hier überwachten Bauteile, Baugruppen und Komponenten einer mit der LCU ausgerüsteten Waschmaschine werden nur noch am Ende der tatsächlichen Lebensdauer getauscht, da ihr Abnutzungsgrad durch die LCU erfasst wird. Dadurch gibt es keinen unbegründeten Austausch von noch funktionstüchtigen Teilen aufgrund starrer Wartungsintervalle. Durch präventive Instandhaltung werden schwere Schäden und Totalausfälle dieser Komponenten und der Waschmaschine als Ganzes sowie auch Mangelfolgeschäden vermieden. Die eingesetzten Markierungen ermöglichen eine automatisierte oder teilautomatisierte Demontage, so dass eine - im Vergleich zur manuellen - kostengünstigere Demontage ermöglicht wird. Außerdem erleichtern Markierungen die Demontage der Waschmaschine. Eine schnelle und eindeutige Fehlerdiagnose reduziert Kosten für Störungsdiagnosen und ermöglicht eine Störungsfrüherkennung. Außerdem entfällt das Risiko vorsätzlicher oder unbeabsichtigter Fehldiagnosen durch den Kundendienst. Die LCU trägt zu einer längeren Lebensdauer der Waschmaschine bei und zögert den Zeitpunkt des Neukaufs hinaus. Für den Benutzer ergibt sich eine Einsparung, da er sein Kapital länger anderweitig produktiv einsetzen kann.

Stiftung Warentest ermittelte im Rahmen von Dauertests die am häufigsten auftretenden Funktionsstörungen bei Waschmaschinen<sup>11</sup>:

- starke Vibrationen beim Schleudern,
- Programmablaufstörungen und -ausfälle,
- defekter Programmwahlschalter,
- mangelndes Rückhaltevermögen der Fremdkörperfalle und daraus resultierender Ausfall der Pumpe,
- nicht haftende Leimung zwischen Außenabdeckung und Innendeckel,
- Korrosion an Trommelwellen, Lagern, Laugenbehältern und Trommeln,
- defekte Dichtungen,
- defekte Türschlösser,
- Löcher im Verbindungsschlauch,
- Ausfall der Thermostate,
- Gummiabrieb,
- Kontaktprobleme an der Steuereinheit,

---

<sup>11</sup> test, 1991-1998.

- Ausfall der Motoren durch Abnutzung der Kohlebürsten und
- defekte Schraubbefestigungen.

Ist der Grad der Abnutzung der einzelnen Bauteile durch den Einsatz der LCU bekannt, kann präventiv ein gezielter Austausch der entsprechenden Teile erfolgen. Der Einsatz der LCU im Beispielprodukt Waschmaschine ermöglicht es, durch Vergleich und Interpretation von erfassten Lebenslaufdaten mit dem gespeicherten Zuverlässigkeitsmodell den Abnutzungsgrad der Waschmaschine zu bestimmen. So kann die Restnutzungsdauer von Komponenten und Waschmaschine als Ganzes bestimmt werden. Ein besonderer Vorteil der LCU am Beispielprodukt Waschmaschine besteht im Hinblick auf Störungsdiagnose und -früherkennung. Im Fall einer nahenden Störung kann die LCU mit dem Nutzer z.B. über ein Display kommunizieren. Alternativ kann die LCU auch vollautomatisch einen Schaden direkt an einen Anpassungsdienstleister (z.B. eine Demontagefabrik) melden. Dabei kann der Nutzer entscheiden, ob er die Reparatur sofort durchführen lassen oder die Restnutzungsdauer bis zum Ende ausschöpfen möchte. Der Kundendienst muss nicht wie bisher zum Kunden fahren, das Produkt zur Diagnose demontieren, das Ersatzteil möglicherweise erst bestellen, um dann erneut den Kunden aufzusuchen. Auch die Möglichkeit einer in betrügerischer Absicht oder unbeabsichtigt gestellten Fehldiagnose ist somit nicht mehr gegeben.

Anhand von Preislisten verschiedener Kundendienste für Waschmaschinen wurde das Einsparpotenzial einer beispielhaften Störungsbeseitigung evaluiert. Im Fall eines Schadens an der Pumpe der Waschmaschine kann die LCU der Maschine den Schaden durch Auswertung der Messdaten erkennen. Auf dem Display in der Bedienungseinheit der Waschmaschine wäre dann für den Benutzer schon einige Zeit vor dem Totalausfall der Waschmaschine der Schaden im Klartext zu erkennen. Das Einsparpotenzial stellt Tabelle 19 dar.<sup>12,13</sup>

Leistung des Kundendienstes	Kosten ohne LCU [€]	Kosten mit LCU [€]
An- und Abfahrt Diagnose (Pauschale)	40,00 €	entfällt
Teilerlegung zwecks Fehlerdiagnose (0,5 h × 50 €/h)	25,00 €	entfällt
An- und Abfahrt Reparatur (Pauschale)	40,00 €	40,00 €
Einbau der neuen Pumpe (0,75 h × 50 €/h)	37,50 €	37,50 €
Ersatzteilkosten Pumpe	60,00 €	60,00 €
<b>Gesamtkosten</b>	<b>202,50 €</b>	<b>137,50 €</b>

**Tabelle 19:** Einsparpotenzial bei einer einzigen Reparatur durch Einsatz der LCU

<sup>12</sup> Preisliste: Ersatzteil-Kurier24, Fa. Schröder, Bergheimer Strasse 94, 41464 Neuss (<http://es-24.de>), 2001.

<sup>13</sup> Preisliste: Miele Kundendienst, Miele & Cie. GmbH&Co, Carl-Miele-Strasse 29, 33332 Gütersloh, 2001.

Somit ergibt sich ein Einsparpotenzial von 65 € ( $\approx 32\%$ ) für eine einzige Reparatur. Das so berechnete Einsparpotenzial ist weitgehend unabhängig von der Ursache der Reparatur. Die Einsparung entsteht durch den Wegfall der An- und Abfahrtpauschale sowie der Teilerlegung zwecks Fehlerdiagnose. Diese könnte auch im Fall des Austausches von Antriebsmotor, Heizstab oder einem beliebigen anderen Bauteil der Maschine aufgrund einer eindeutigen Diagnose mit Hilfe der LCU eingespart werden. Durch Einsatz von LCU ist es möglich, teure und schwere Schäden sowie Totschäden und deren Folgeschäden zu verhindern, da präventiv eingegriffen werden kann.

Im beispielhaften Fall eines Schadens am Einlassventil der Waschmaschine lässt sich dieser Effekt veranschaulichen: Mit der LCU ist es möglich, durch Erfassung der Schaltspielanzahl den Abnutzungsgrad der Magnetventile zu bestimmen. Nähert sich der Abnutzungsgrad einem Grenzwert, kann die LCU den Benutzer in Klartext auf einem Display vor einem Totalausfall des Einlaufventils warnen. Der Benutzer hat dann die Möglichkeit, sich mit dem Kundendienst in Verbindung zu setzen und gezielt den Austausch des Einlaufventils zu veranlassen. Der Materialpreis eines Einlaufventils beträgt abhängig vom Hersteller und dem Waschmaschinentyp zwischen 20 € und 75 €. Hinzu kommen bei einer Reparatur die in Tabelle 19 aufgeführten Kosten für An- und Abfahrt sowie Montage in Höhe von insgesamt 77,50 €. Der Schaden bei einem Totalausfall des Ventils und insbesondere der mit einem Totalausfall verbundene Mangelfolgeschaden kann, wenn man beispielsweise von einem möglichen Wasseraustritt aus der Maschine und den daraus resultierenden Schäden in der Umgebung der Waschmaschine ausgeht, diese Kosten jedoch um ein Vielfaches übersteigen.

#### **4.6.4.3 Monetär nicht bewertbare Leistungen**

Die Nutzwertanalyse hat den Zweck, die monetär nicht bewertbaren Leistungen einer Waschmaschine mit und ohne LCU miteinander zu vergleichen, um die Entscheidungsgrundlage zu verbreitern. Zunächst wird für jedes Kriterium eine Gewichtung festgelegt. Dabei wird nach dem Kriterium der Bedeutsamkeit eine Punktzahl vergeben, so dass die Summe aller Gewichtungen 100 ergibt. Diese Gewichtungen werden in die Spalte Gewichtung eingetragen. In einem weiteren Schritt werden die beiden Alternativen hinsichtlich der Erfüllung der Kriterien bewertet. Hierbei ist eine Punktzahl zwischen 0 und 10 zu vergeben und in die Spalte „B“ (Bewertung) einzutragen. Erfüllt eine Alternative ein Kriterium gut, so wird eine hohe Punktzahl vergeben, erfüllt sie es weniger gut, wird eine niedrigere Punktzahl eingetragen. Die Waschmaschine ohne LCU erfüllt die meisten der bewerteten Kriterien auf durchschnittliche Weise, während das Beispielprodukt mit LCU diese Kriterien besser erfüllt. Daher erhält das Beispielprodukt ohne LCU in vielen Fällen eine durchschnittliche Bewertung (5 Punkte), während das Beispielprodukt mit LCU besser bewertet

wird und eine entsprechend höhere Punktzahl erhält. Im nächsten Schritt werden die Punkte der Bewertung für jedes Kriterium mit den jeweiligen Punkten der Gewichtung multipliziert. Das Ergebnis wird in der Spalte „gB“ (gewichtete Bewertung) eingetragen. Im letzten Schritt werden die beiden Spalten „gB“ (gewichtete Bewertung) jeweils summiert, um eine Gesamtpunktzahl zu erhalten. Als Resultat ist die Alternative mit der höchsten Gesamtpunktzahl zu bevorzugen.

monetär nicht bewertbare Leistung	Gewichtung	WM mit LCU		WM ohne LCU	
		B	gB	B	gB
<b>kundenbezogen:</b>					
Image-Vorteile durch umweltfreundliche Konstruktion	20	7	140	5	100
Anpassung des Produktes an Kundenwünsche	35	7	245	5	175
<b>herstellerbezogen:</b>					
Auswertung von Reklamationen bezüglich Fehlerart und Produktzuverlässigkeit	10	10	100	5	50
Marktforschung bezüglich Ausfallverhalten und Gebrauchstauglichkeit des Produktes	10	10	100	5	50
Reduzierung des Produkthaftungsrisikos	10	7	70	5	50
technische Beherrschbarkeit der Produktherstellung	15	4	60	10	150
<b>Summe</b>	<b>100</b>		<b>715</b>		<b>575</b>

B = Bewertung der Kriterien (Skala: 0-10 Punkte)

gB = gewichtete Bewertung der Kriterien

**Tabelle 20:** Nutzwertanalyse der Waschmaschine (WM)

Nur beim Kriterium „technische Beherrschbarkeit der Produktherstellung“ schneidet eine Waschmaschine mit LCU schlechter als die gleichwertige Alternative ohne LCU ab. Gemessen an den monetär nicht bewertbaren Leistungen ist die Investition in eine Waschmaschine mit LCU der in eine Waschmaschine ohne LCU vorzuziehen. Gleichwohl können die monetär nicht bewertbaren Leistungen nicht allein ausschlaggebend für einen LCU-Einsatz sein. Bietet aber der Kosten- und Leistungsvergleich einen Vorteil für die LCU, so wird dieser durch ein positives Ergebnis der monetär nicht bewertbaren Leistungen noch verstärkt.

#### 4.6.5 Gegenüberstellung und Bewertung der Ergebnisse

Bei den Methoden der dynamischen Investitionsrechnung stellt die Kapitalwertmethode für eine intelligente Investitionsentscheidung die beste Grundlage dar [BRE-00]. Für das weitere Vorgehen wurden die folgenden Prämissen festgelegt:

- im Zeitablauf unveränderlicher einheitlicher Kalkulationszinsfuß  $i = 10\%$  und
- Zeitraum  $T = 5$  Jahre.

Dieser bewusst knapp bemessene Zeitraum garantiert im Falle eines ökonomischen Erfolgs in diesem kurzen Zeitraum, dass sich der Einsatz einer LCU bei praxisnahen, d.h. längeren Nutzungsdauern, ökonomisch noch besser rechtfertigt. Zur Berech-

nung des Kapitalwertes werden die mit dem Einsatz der LCU verbundenen Ein- und Auszahlungen benötigt. Exakt bekannt sind aus Kapitel 4.6.1 nur die durch Kosten verursachten Auszahlungen. Die durch Leistungen bedingten zu erwartenden Einzahlungen sind nicht exakt zu beziffern und in ihrer Höhe abhängig von einzelfallspezifischen Einsatzbedingungen der LCU. Um trotzdem eine Investitionsrechnung auf Basis der Kapitalwertmethode durchführen zu können, bieten sich die Methoden der quantitativen Investitionsrechnung unter Risiko an. Zum Einsatz kommt die Sensitivitätsanalyse mit ihrem Spezialfall der Berechnung von kritischen Werten (Break-Even-Analyse) in Verbindung mit der Kapitalwertmethode [DÄU-91, HOF-00, SCH-77].

Risikobehaftet sind bei dieser Berechnung in erster Linie die über den betrachteten Zeitraum zu erwartenden Einzahlungen. Ziel der Untersuchung ist es, die Größenordnung der Einzahlungen zu ermitteln, die notwendig ist, um einen kritischen Kapitalwert von  $KW_{krit} = 0$  zu erreichen. Hiermit wird derjenige Mindestrückfluss bestimmt, den der Einsatz einer LCU garantieren muss, damit ihr Einsatz wirtschaftlich sinnvoll ist. Da eine Prognose des zeitlichen Verlaufs der Einzahlungen nicht möglich ist, wird lediglich mit gleichbleibenden Einzahlungen über die gesamte Nutzungszeit und einer einmaligen Investitionsauszahlung in Höhe der Anschaffungskosten der LCU von 93,35 Euro zum Anfangszeitpunkt der Nutzung gerechnet:

Es ergibt sich ein Mindestrückfluss von 24,63 Euro pro Jahr, damit eine Investition in die LCU wirtschaftlich wird. Je höher die Einzahlungen ihn übertreffen, um so wirtschaftlicher ist die Investition in die entsprechende LCU. In Tabelle 21 sind die Kosten und der Nutzwert der Waschmaschine mit und ohne LCU gegenübergestellt.

	WM mit LCU	WM ohne LCU
Grundpreis WM: (geschätzt)	1.000,00 €	1.000,00 €
Kosten der LCU (aus Tabelle 18)	93,35 €	0,00 €
<b>Gesamtkosten</b>	1.093,35 €	1.000,00 €
<b>Nutzwert</b> (Punktzahl aus Tabelle 20)	715 Punkte	575 Punkte

**Tabelle 21:** Gegenüberstellung monetär bewertbarer und nicht bewertbarer Kosten und Leistungen für die Waschmaschine

Großen Vorteilen auf der Seite der monetär nicht bewertbaren Leistungen stehen erhebliche Mehrkosten durch den Einbau einer LCU gegenüber. Alle genannten Vorteile der LCU verlieren jedoch an Bedeutung, wenn der Einsatz der LCU unwirtschaftlich im Sinne des Kosten-Leistungs-Vergleichs ist. Es ist also zu prüfen, inwieweit die Mehrkosten durch monetär bewertbare Leistungen der LCU in der Waschmaschine gedeckt sind, da monetäre Verluste nur bedingt durch positive Effekte monetär nicht bewertbarer Leistungen, welche auf subjektiven Empfindungen basieren, kompensiert werden können. Um diese Frage beantworten zu können, werden die in

Tabelle 22 noch einmal zusammengefassten Kosten und Leistungen der Waschmaschinen-LCU benötigt.

	WM mit LCU	WM ohne LCU
Gesamtkosten	1.093,32 €	1.000,00 €
durchschnittliche Einzahlungen (hier: Ersparnisse) pro Jahr, die bei einer Lebensdauer von 5 Jahren mindestens realisiert werden müssen, damit die Investition in die LCU wirtschaftlich wird (Mindestrückfluss):	24,63 €	0,00 €
Kosten einer einzigen Reparatur (Austausch der Pumpe):	137,50 €	202,50 €

**Tabelle 22:** Ergebnisse für das Beispielprodukt Waschmaschine

Durch Leistungen der LCU müssen jährlich durchschnittliche Einsparungen von mindestens 24,63 € realisiert werden, damit die Investition in die LCU wirtschaftlich ist. Tatsächlich können, wie die Berechnungen zum Reparaturaufwand in Kapitel 4.6.4 zeigen, diese Einsparungen relativ schnell realisiert werden. Folgende drei Szenarien verdeutlichen dieses:

a) Die Waschmaschine ist während der fünf betrachteten Jahre nicht defekt. Da der Mindestrückfluss für fünf Jahre in Höhe von 123,10 € durch Einsparungen bei Reparaturen nicht realisiert werden kann, ist der Einsatz der LCU im Beispielprodukt Waschmaschine unwirtschaftlich, wenn nur die monetär bewertbaren Kosten und Leistungen betrachtet werden.

b) Die Waschmaschine ist während der fünf betrachteten Jahre zwei Mal defekt. Hierbei liegt das mit dem Einsatz der LCU verbundene Einsparpotenzial durch Reparaturen bei 130 € (2 Reparaturen mit je 65 € Einsparpotenzial). Der notwendige Mindestrückfluss beträgt 123,10 € und wird damit von den tatsächlich erzielten Einsparungen durch Reparaturen in Höhe von 130 € leicht übertroffen. Somit ist der Einsatz der LCU im Beispielprodukt Waschmaschine wirtschaftlich positiv zu beurteilen. Darüber hinaus sind neben den übrigen Leistungen, die in Kapitel 4.6.2 aufgezeigt werden, auch die monetär nicht bewertbaren Leistungen in die Entscheidung zur Wirtschaftlichkeit einzubeziehen. Die Betrachtung dieses Szenarios zeigt gleichzeitig, dass schon bei zwei Reparaturen über einen Zeitraum von fünf Jahren ein Break-Even-Punkt erreicht ist, ab dem der Einsatz der LCU in einer Waschmaschine bei ausschließlicher Betrachtung des Reparaturaufwandes wirtschaftlich positiv zu beurteilen ist.

c) Die Waschmaschine ist während der fünf betrachteten Jahre drei Mal defekt. In diesem Fall ist der Einsatz der LCU im Beispielprodukt Waschmaschine aus ökonomischer Sicht positiv zu beurteilen. So steht dem notwendigen Mindestrückfluss von



123,10 Euro ein Einsparpotenzial von 195 Euro gegenüber und wird somit deutlich übertroffen. Neben den übrigen Leistungen aus Kapitel 4.6.2 sind auch die monetär nicht bewertbaren Leistungen des Kapitels 4.6.3 geeignet, den Einsatz der LCU im Beispielprodukt Waschmaschine wirtschaftlich positiv erscheinen zu lassen. Auch der in Kapitel 4.6.4 beleuchtete Aspekt des Mangelfolgeschadens am Beispiel eines Einlaufventils in der Waschmaschine lässt deutlich das große Einsparpotenzial erkennen, dass sich aus dem Einsatz der LCU im Beispielprodukt Waschmaschine ergibt. Generell lässt sich sagen, dass für jeden Einzelfall der Praxis untersucht werden muss, ob der Einsatz einer LCU wirtschaftlich möglich ist. So wird es schwierig sein, eine mit komplexer Messtechnik der Sensoren-Klasse 3 ausgestattete LCU in eine Waschmaschine oder ein anderes Produkt der gleichen Preisklasse wirtschaftlich zu integrieren. Im untersuchten Fall der Waschmaschine liegt der Anteil der Kosten für die LCU an den Gesamtkosten des Endprodukts bei 8,5%. Die Ausführung und damit die Kosten der LCU müssen dem späteren Einsatzort und -zweck so angepasst werden, dass plausibel angenommene jährliche Einsparungen mit dem Produkt auch erreicht werden können. Ferner ist zu beachten, dass diese LCU auf Basis heutiger Preise für die Untersysteme ökonomisch abgeschätzt wurde. Für die Zukunft sind aber aufgrund des technischen Fortschritts der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik weit niedrigere Preise zu erwarten.

#### **4.7 Auslegung der LCU**

Grundsätzlich gibt es die in Kapitel 4.4 abgeleiteten 21 möglichen Kombinationen aus den vier Untersystemen und den drei Elementen des LCBs eine LCU zusammenzustellen. Jedoch können zwei gleich kombinierte LCUs verschieden ausgelegt werden. Variationen sind Art, Anzahl und Anschaffungskosten sowie technische Parameter der Untersystemelemente. Es wird eine Methode entwickelt, die für das technisch-ökonomische Anwendungsfeld eines Produktes die Auslegung der LCU bestimmt.

So kann das Produkt Ventilator für einen sich im privaten Gebrauch befindlichen PC als auch für einen Zentral-Server einer Bank verwendet werden. Beide Anwendungen des gleichen Produktes haben verschiedene Anforderungen hinsichtlich der Zuverlässigkeit des Produktes. Während der Ausfall im privaten PC nur für den privaten Nutzer einen Schaden darstellt, ist der Schaden im Fall des Servers der Bank höher zu bewerten, so dieser vielleicht die kryptografischen Urschlüssel aller Zahlungssysteme vorhält. Für das gleiche Produkt Ventilator ergeben sich in beiden Anwendungen, d.h. in seinem Anwendungsfeld, verschiedene Bewertungen der Kriterien zur Realisierung der LCU. Somit muss die LCU beim gleichen Produkt verschieden ausgelegt werden.

Im ersten Schritt wird bewertet, ob das Produkt in seiner Anwendung einer LCU bedarf. Hierzu dienen die sieben sowohl vom Produkt als auch von der Anwendung in ihrer Gewichtung zu bewertenden Kriterien

- **Anpassungsumfang** des Produktes (in der Anwendung),
- **Anschaffungskosten** des Produktes,
- **Marktdurchdringung** des Produktes in seinem Anwendungsfeld,
- **Nutzungsdauer** des Produktes (in der Anwendung),
- geforderte **Sicherheit** des Produktes (in der Anwendung),
- geforderte **Verfügbarkeit** des Produktes (in der Anwendung) und
- geforderte **Zuverlässigkeit** des Produktes (in der Anwendung).

Der Anpassungsumfang wird bestimmt durch die zur Durchführung der Anpassung eines Produktes benötigten organisatorischen Maßnahmen, Betriebsmittel und Prozesse. Beispiele für organisatorische Maßnahmen sind Dauer, Häufigkeit und Intensität eines Anpassungsprozesses, für Betriebsmittel Prüf-, Demontage- und Reinigungswerkzeuge sowie für Anpassungsprozesse Demontage und Remontage. Die Nutzungsdauer ist die Dauer der Nutzung zwischen zwei Anpassungsvorgängen. Die Marktdurchdringung beschreibt die Durchdringung eines Marktes oder einer Verbrauchergruppe mit Produkten [GAB-01]. Unter Sicherheit eines technischen Systems wird die Abwesenheit von Gefahren für Leib und Leben verstanden [VDI 3780]. Die Verfügbarkeit ist der Quotient aus Nutzungszeit und der Summe aus Nutzungszeit und Anpassungszeit. Wie bereits in 2.3.1 beschrieben, ist die Zuverlässigkeit eines Produktes die Wahrscheinlichkeit dafür, dass es während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.

Der Produktentwickler muss anhand dieser sieben Kriterien das Anwendungsfeld des Produktes bewerten. Als Beispiel zur Beschreibung des Bewertungsverfahrens soll das Produkt ‚Gummischlauch‘ dienen, dessen Anwendungsfeld aus den beiden Anwendungen ‚Abwasserschlauch einer Waschmaschine‘ und ‚Schlauch eines Kesselwagens für aggressive chemische Medien‘ besteht. Das Anwendungsfeld des Schlauchs eines Kesselwagens wird kurz umrissen: Der Schlauch dient zum Befüllen und Abpumpen des Kesselwagens mit verschiedenen zum Teil aggressiven, chemischen Medien. Beide Vorgänge sind bedient, d.h. unter der Aufsicht eines Werkers. Nach jedem Medienwechsel muss der Schlauch gereinigt werden. Aufgrund der zum Teil aggressiven Medien muss die Sicherheit des Schlauchs durch Überwachung gewährleistet werden.

In Tabelle 23 werden die sieben Kriterien für das Anwendungsfeld des Produktes Gummischlauch bewertet.

<b>Anwendung Kriterium</b>	Gummischlauch in Waschmaschine	Gummischlauch in Kesselwagen
Anpassungsumfang	gering, da nur wenn Schlauch beschädigt	hoch, da nach jedem Me- dienwechsel Reinigung
Anschaffungskosten	gering	mittel
Marktanteil	hoch	mittel
Nutzungsdauer	lang (ca. 10 Jahre)	mittel
Sicherheit	mittel, nur Schutz vor Was- serschaden	hoch, da Personen- und Um- weltschaden möglich
Verfügbarkeit	mittel	gering
Zuverlässigkeit	mittel	hoch

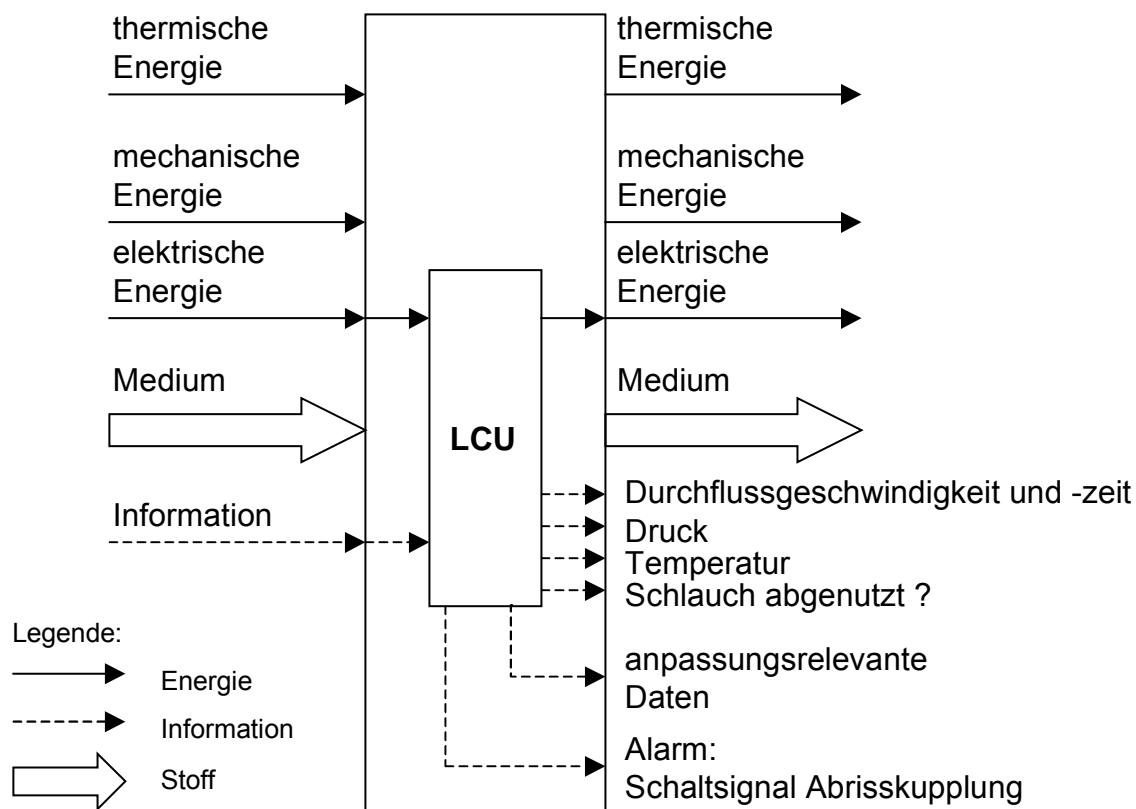
Tabelle 23: Bewertung des Produktes Gummischlauch in zwei Anwendungen zur Ermittlung des Bedarfs einer LCU

Die Anschaffungskosten beziehen sich nur auf das Produkt und umfassen nicht eventuell benötigte Zusatzprodukte wie z.B. eine ‚AquaStopp-Einheit‘ bei der Waschmaschine oder Abrisskupplung des Kesselwagens. Die Marktdurchdringung des Schlauchs der Waschmaschine ist höher als die des Kesselwagens, da es mehr Waschmaschinen auf dem Markt gibt als Kesselwagen für gefährliche, aggressive Medien. Die Nutzungsdauer des Waschmaschinenschlauchs ist ebenfalls höher als die des Kesselwagensschlauchs, da der Kesselwagenschlauch sich aufgrund der aggressiveren zu transportierenden Medien schneller abnutzt. Die geforderte Sicherheit des Produktes Schlauch in der Anwendung Kesselwagen ist höher als bei der Waschmaschine, da im Fall eines Schadens beim Kesselwagenschlauch aufgrund der gefährlichen austretenden Medien sogar Personen- und Umweltschaden möglich ist. Die Waschlauge ist weder in Menge noch chemischer Aggressivität als gefährlich für Menschen und Umwelt zu bewerten. Vor dem Hintergrund des geforderten hohen Anpassungsumfangs der Kesselwagenanwendung ist die Verfügbarkeit geringer als bei der Waschmaschine, da die Anpassung des Schlauchs in Form einer Reinigung nach Medienwechsel oder nach besonders aggressiven Medien wesentlich zur Lebensdauer und Sicherheit des Produktes beiträgt. Der Kesselwagenschlauch darf während der Nutzungszeit nicht ausfallen, da er ein absolut sicherheitsrelevantes Bauteil ist. Selbst wenn der Waschmaschinenschlauch ausfällt, sind die möglichen Auswirkungen des Schadens geringer als bei der Kesselwagenanwendung zu bewerten.

Anhand dieser Erwägungen muss der Produktentwickler abschätzen, ob beide, nur eine oder gar keine Anwendung des Produktes Gummischlauch mit einer LCU ausgestattet wird. Dabei muss beachtet werden, dass die sieben Kriterien von Anwen-

derung zu Anwendung verschiedene Gewichtungen erhalten. Von überragender Bedeutung bei der Anwendung Kesselwagen ist das Kriterium ‚Sicherheit‘. Aus diesem Grund bedarf diese Anwendung einer LCU. Auch die Anwendung des Gummischlauchs in einer Waschmaschine kann abhängig von Preisklasse der Waschmaschine, Firmenphilosophie und Image des Herstellers einer LCU bedürfen, wie die Ausstattung einiger Waschmaschinen mit einer ‚AquaStopp-Einheit‘ zeigt. Zur Auslegung der LCU wird hier nur mit der ersten Anwendung fortgefahren.

Im zweiten Schritt muss geklärt werden, wie die LCU ausgelegt sein muss. Dazu wird das Produkt in seinem Anwendungsfeld einer Systemanalyse unterzogen. Hierbei wird ein Produkt als technisches System betrachtet, welches die Eingangsgrößen Energie, Information und Stoff in Ausgangsgrößen transformiert und dadurch eine Funktion erfüllt [KOL-98]. In Bild 47 ist das Systemmodell des Produkts Gummischlauchs in der Anwendung Kesselwagen mit LCU dargestellt.



**Bild 47:** Systemmodell des Gummischlauchs in der Anwendung Kesselwagen

Die beiden Eingangsgrößen Energie und Stoff passieren den Schlauch unverändert. Lediglich ein Teil der mechanischen Energie des fließenden Mediums wird durch Reibung in thermische Energie des Schlauchs umgewandelt. Die elektrische Energie dient dem Betrieb der LCU. Sie erfasst die Größen Durchflussgeschwindigkeit, Druck im Schlauch, Temperatur des Mediums sowie die Abnutzung des Schlauchs und

verarbeitet sie zu Anpassungsdaten. Mit diesen Daten lässt sich eine Aussage hinsichtlich einer notwendigen Anpassung aufgrund Medienwechsel, Abnutzung sowie eines Schadens treffen. Die Messung der Durchflussgeschwindigkeit dient der Bestimmung der Durchflussmenge. Die restlichen drei Messgrößen dienen der Gewährleistung der Zuverlässigkeit und Sicherheit des Schlauchs. Nach erfolgter Systemanalyse wird die LCU anhand der Kriterien für die vier LCU-Untersysteme (Tabelle 24) ausgelegt.

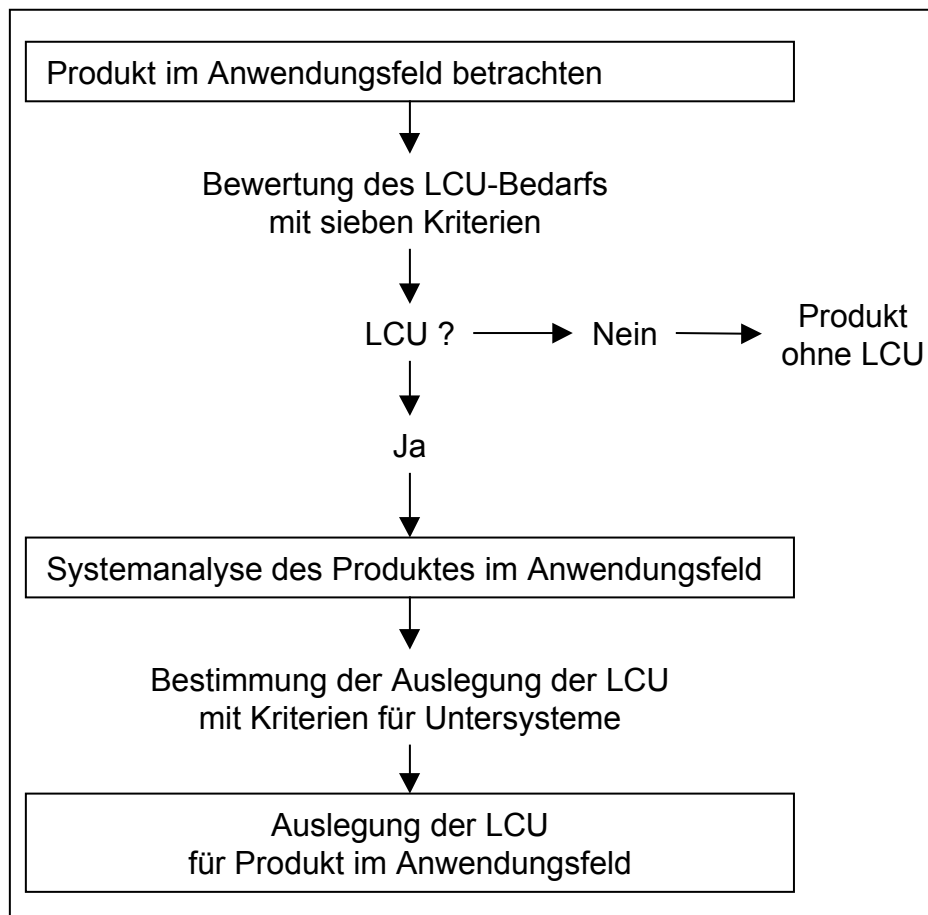
Unter-system	Kriterien	
Sensorik	Abmaße, Anschaffungskosten, Ausfallwahrscheinlichkeit, Betriebskosten (Eichung, Kalibrierung), Einbauort, Einschwingverhalten, EMV, Explosionsschutz, Fremdkörperschutz, Genauigkeit, Intelligenz (bus-, funk- und protokollfähig, eigene Signalverarbeitung, Zeitstempel), Messbereich, Messgröße, Schutzart, Signal-Rausch-Verhältnis, Stromverbrauch, Zugänglichkeit	
Markierung	Abmaße, Anschaffungskosten (Barcodes, Lackfarben und Peripherie wie Lese- und Schreibsysteme), Speichergröße, Umweltbeständigkeit, Zugänglichkeit	
LCB	Speicher	Anschaffungskosten, EMV, Lese- und Schreibgeschwindigkeit, Schreibzyklenanzahl, sichere Speicherzeit, Speicherkapazität, Volatilität, Wiederbeschreibbarkeit, Zugriffszeit
	Prozessor	Adressbus, Anschaffungskosten, Architektur, Bussystem, Datenbus, EMV, Taktrate
	Interface	Anschaffungskosten, busfähig, drahtlos/drahtgebunden, seriell/parallel, Übertragungsgeschwindigkeit
Aktorik	Abmaße, Anschaffungskosten, Ausfallwahrscheinlichkeit, Betriebskosten (Eichung, Kalibrierung), Einbauort, Einschwingverhalten, EMV, Explosionsschutz, Fremdkörperschutz, Genauigkeit, Intelligenz (bus-, funk- und protokollfähig, eigene Signalverarbeitung, Zeitstempel), Schutzart, Signal-Rausch-Verhältnis, Stromverbrauch, Wirkgröße, Wirkgrößenbereich, Zugänglichkeit	

**Tabelle 24:** Kriterien der vier LCU-Untersysteme zur Auslegung der LCU

Aus dem Systemmodell in Bild 47 und dem Anwendungsfeld lässt sich ableiten, dass die vier Sensoren im Fall des Kontakts mit dem Medium durch dieses nicht zerstört werden dürfen. Die Durchflussgeschwindigkeit wird nach dem Wirbelfrequenzprinzip gemessen, d.h. dass dieser Sensor Mediumkontakt hat. Die Druckmessung kann kontaktlos mit Dehnungsmessstreifen im Schlauchmantel erfolgen. Das gleiche gilt für den im Schlauchmantel integrierten Temperatursensor. Wäre eine höhere Genauigkeit der Temperaturmessung gefordert, so müsste der Temperatursensor auch in das Medium eintauchen. In diesem Anwendungsfeld dient die Temperaturmes-

sung dem Schutz des Schlauchs vor dem Schmelzen bei einem zu heißen Medium. Hierfür muss die Temperatur bei der Wahl eines ausreichenden Sicherheitsbereiches nicht hoch genau gemessen werden, so dass der Sensor im Mantel integriert sein kann und keine hohe Genauigkeitsklasse erfüllen muss. Die Abnutzung des Schlauchs verursacht durch aggressive Medien wird mit einem im Schlauchmantel eingelassenen Kupferdraht erfasst. Ist der Schlauch unversehrt, so hat der Draht mit dem Medium keinen Kontakt und kann elektrischen Strom leiten. Wird der Schlauch durch ein aggressives Medium angegriffen, so wird auch der Draht schnell unterbrochen, was einfach durch das LCB detektiert werden kann. Die Durchflusszeit misst die LCU elektronisch.

Das LCB benötigt nur wenig Speicher, da der Schlauch nur während des Pumpvorgangs unter der Aufsicht eines Werkers verwendet wird und im Fall einer nötigen Anpassung oder eines Alarms dieses sofort meldet. Es gibt deshalb keinen Bedarf, große Datenmengen zu speichern. An den Prozessor des LCB werden ebenfalls keine großen Anforderungen gestellt, da die zu verarbeitenden Datenmengen klein (nur vier Sensoren, eine Zeitmessung und ein Aktor) sind. Die Messung der Größen ist nicht zeitkritisch, da eine Verarbeitungsgeschwindigkeit im Millisekundenbereich ausreicht. Das Interface des LCB kann sowohl drahtgebunden oder drahtlos ausgeführt sein. In Anbetracht einer Schlauchlänge von einigen Metern und der alles überragenden Anforderung an die Sicherheit des Systems ist allerdings ein drahtgebundenes Interface vorzuziehen, wobei aufgrund der Gefahr einer elektrostatischen Aufladung empfindlicher Medien auf einen korrekt ausgeführten Potentialausgleich zwischen Gummischlauch, Erde und Interface geachtet werden muss. Insgesamt erfordert diese Anwendung ein LCB der untersten Preiskategorie im einstelligen Eurobereich. Die LCU verfügt über einen Thyristor als Aktor, um die Abrisskupplung im Alarmfall direkt ansteuern und schließen zu können. Die LCU benötigt keine Markierungen. Die Methode zur Auslegung der LCU für ein Produkt in einem Anwendungsfeld wird zusammengefasst in Bild 48 dargestellt.



**Bild 48:** Methode zur Auslegung der LCU eines Produktes in seinem Anwendungsfeld

#### 4.8 Geschäftsfeldbetrachtung

Für die Evaluierung potenzieller Geschäftsfelder wird nicht das vorhandene Güterspektrum einer Volkswirtschaft betrachtet und beispielsweise nach Investitions-, Gebrauchs- und Verbrauchsgütern klassifiziert. Wie in Kapitel 4.7 dargestellt, wird die Entscheidung über einen Einsatz der LCU durch die Kombination des Produktes mit seinem Anwendungsfeld bestimmt. Zusätzlich wird bei der Evaluierung eines Geschäftsfeldes auch das Entwicklungsfeld der LCU betrachtet, da durch neue Kombinationen aus Produkt, Anwendung und Auslegung der LCU ein neues Geschäftsfeld entstehen kann (Bild 49).

Mögliche Geschäftsfelder müssen immer im Zusammenhang mit potentiellen Interessenten an diesem Geschäftsfeld gesehen werden. Deshalb werden in Kapitel 4.8.1 die an den LCU-Diensten interessierten Gruppen identifiziert und beschrieben. Auf Basis der vier LCU-Dienste aus Kapitel 4.6.2 und der definierten Interessengruppen werden in Kapitel 4.8.2 die Geschäftsfelder des Beispielprodukts Waschmaschine entwickelt. In Bild 49 ist die Kopplungsmatrix zwischen den Produkten, Anwendungen und Auslegungen der LCU dargestellt. Dick umrandet ist das hier ausgeführte Produkt Gummischlauch in der Anwendung Kesselwagen und der hierfür aus-

gelegten LCU. Durch Kombination des Produkt- mit dem Anwendungsfeld sowie verschiedener LCU-Auslegungen können neue potenzielle Geschäftsfelder entstehen.

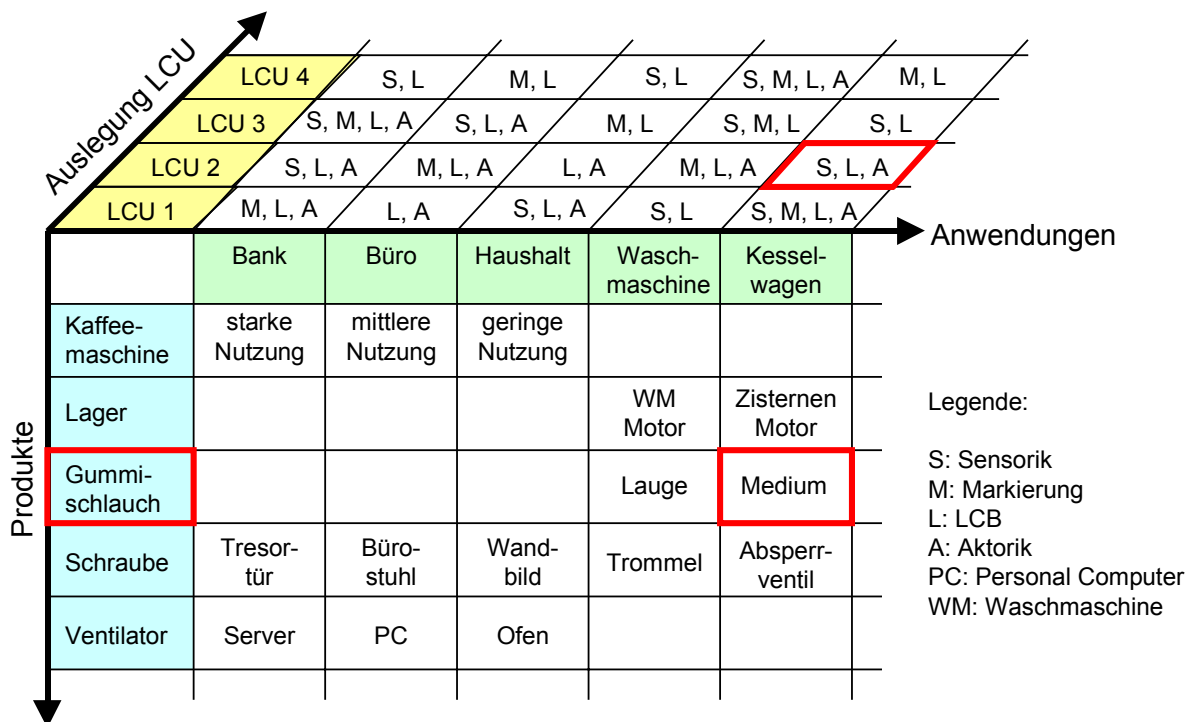


Bild 49: Kopplungsmatrix zwischen Produkten, Anwendungen und Auslegungen der LCU

#### 4.8.1 Interessengruppen an LCU-Diensten

In der Arbeit werden die Gruppen Hersteller, Produktrecycler, Eigentümer und Nutzer als die Interessenten an LCU-Diensten definiert. Jede Gruppe hat spezifische Interessen in den einzelnen Phasen des Produktlebenszyklus an den LCU-Diensten. Diese Interessen können an den Zeitraum vor Erstnutzung, Nutzungsphasen und nach Ende der letzten Nutzungsphase eines Gutes gebunden sein, unabhängig davon, ob im jeweiligen Zeitraum eine Anpassung vorgenommen wird.

Der Zeitraum vor der Erstnutzung eines Gutes erstreckt sich von dessen Konzeption über die Entwicklung und Produktion bis hin zum Vertrieb. Die im Anschluss beginnenden Nutzungsphasen werden jeweils bis zur letzten durch einen Anpassungsprozess voneinander differenziert. Das Ende der letzten Nutzungsphase stellt den Anfang der abschließenden Phase im Produktlebenszyklus eines Gutes dar. In dieser Phase der Entsorgung wird die strukturelle Integrität des Produktes aufgehoben, welches über das Ausmaß eines Anpassungsprozesses hinausgeht. Der Produktlebenszyklus endet hier unabhängig davon, ob Produktkomponenten im Rahmen von Wieder- und Weiterverwendung bzw. -verwertungsmaßnahmen genutzt werden. In Bild 50 ist das Beziehungsgeflecht der LCU bestehend aus LCU-Diensten, Produktlebenszyklusphasen und Interessengruppen dargestellt.



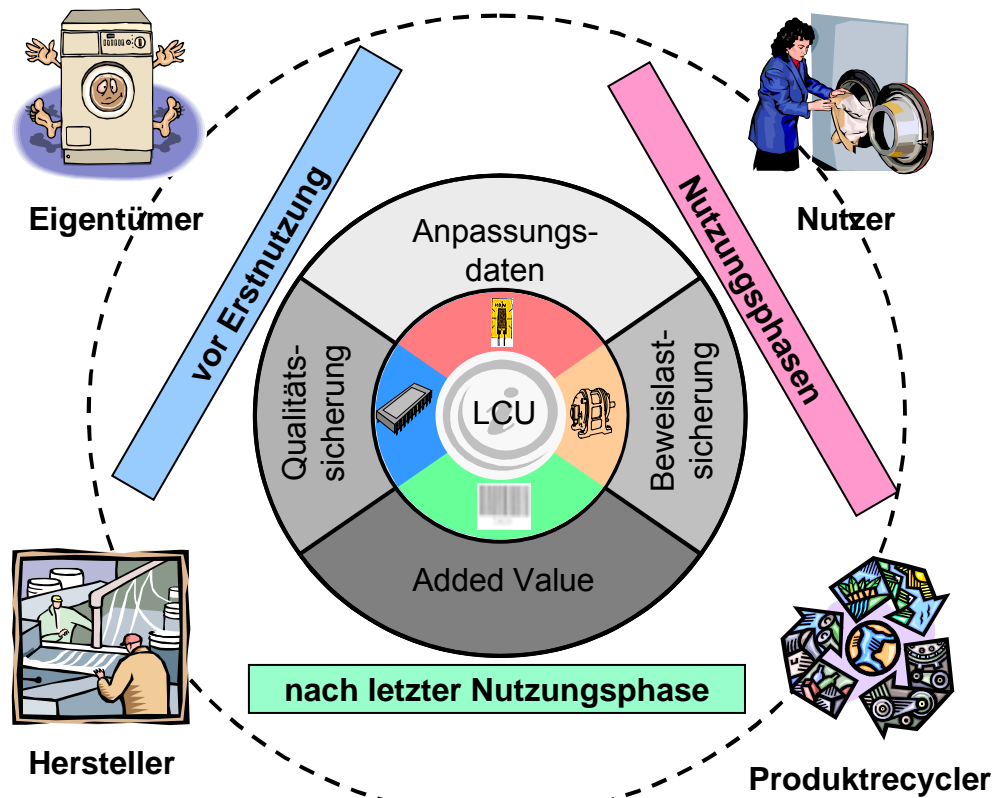


Bild 50: LCU-Dienste im Produktlebenszyklus für Interessengruppen

#### 4.8.1.1 Produktrecycler

Der Produktrecycler bietet als Geschäftsfeld Anpassungsprozesse an (Tabelle 25).

Produktrecycler		Produktlebenszyklusphase		
		vor Erstnutzung	Nutzungsphasen	nach letzter Nutzungsphase
LCU-Dienst	Anpassungsdaten	Anpassungspläne Lebensdauermodelle	Abnutzungsdaten (z.B. Instandhaltungsberichte)	Instandhaltungsberichte, Instandhaltungsbedarf (Ersatzteile)
	Added Value	Vertriebsstatistiken	Nutzungsmodalitäten (Nutzungsort, -zeit und -art)	Bedarfsinformationen zur Wieder- und Weiterverwendung aus dem Markt
	Qualitäts-sicherung	Bereitstellung von QS-Informationen für Hersteller	Sicherung der Qualität während der Nutzungsphase	Qualitätsbeurteilung von Komponenten zur Wieder- und Weiterverwendung
	Beweislast-sicherung	-	Haftungsansprüche aus fehlerhaft erbrachter Anpassung	Haftungsansprüche fehlerhafter wieder-/weiterverwendeter Komponenten

Tabelle 25: Geschäftsfelder des Produktrecyclers

#### 4.8.1.2 Hersteller

Der Hersteller erzeugt das Produkt bzw. Komponenten zur Veräußerung an andere Hersteller, Händler, Endverbraucher (Eigentümer und Nutzer) oder Produktrecycler. Die in der Herstellung des Produktes verwendeten Materialien und Komponenten können hierbei aus der Wieder- und Weiterverwendung stammen. In diesem Fall werden die entsprechenden Güter von einem Produktrecycler bezogen. Das vom Hersteller erstellte Erzeugnis wird als Neuprodukt bezeichnet, auch wenn zur Herstellung nicht nur ausschließlich neue aus Rohmaterial erzeugte Komponenten verwendet werden. In Tabelle 26 werden potenzielle Geschäftsfelder des Herstellers dargestellt.

Hersteller		Produktlebenszyklusphase		
		vor Erstnutzung	Nutzungsphasen	nach letzter Nutzungsphase
LCU-Dienst	Anpassungsdaten	-	-	-
	Added Value	Vertriebsstatistiken	Nutzungsmodalitäten (Nutzungsort, -zeit und -art)	-
	Qualitätssicherung	Sicherung der Qualität während Herstellung	Sicherung von Qualität während Nutzungsphase	-
	Beweislastsicherung	Analyse der Haftungsrisiken	Nutzungsmodalitäten verändertes Haftungsrecht	-

Tabelle 26: Geschäftsfelder des Herstellers

#### 4.8.1.3 Eigentümer

Die Abgrenzung des Begriffes Eigentümer bedarf einer näheren Definition. Ein Ansatz ist, den Begriff in Anlehnung an die ihm ggf. zustehenden Eigentumsrechte zu beschreiben. In der Rechtswissenschaft werden diese üblicherweise als Verfügungsrechte oder auch Property-Rights bezeichnet und in vier Gruppen unterschieden:

- Rechte, welche die Art der Nutzung eines Gutes betreffen (Usus),
- Rechte zur formalen und materiellen Änderung eines Gutes (Ab Usus),
- Rechte der Aneignung von Gewinnen und Verlusten, die durch die Nutzung des Gutes entstehen (Usus fructus) sowie
- Rechte zur Veräußerung des Gutes an Dritte [FRI-96].

Welche Rechte der Eigentümer an dem erworbenen Gut besitzt, ist durch den öffentlich- und privatrechtlichen Rahmen bestimmt. Der Eigentümer einer denkmalgeschützten und vermieteten Wohnung hat weder das Nutzungsrecht noch das uneingeschränkte Änderungsrecht am Gut, ist jedoch berechtigt Miete zu verlangen (Usus fructus) und die Wohnung zu veräußern. Der Eigentümer eines Fahrzeuges darf dieses nicht ohne weiteres als Taxi betreiben (Usus fructus). Auch besitzt er nicht das Verfügungsrecht, dieses technisch zu manipulieren. In Tabelle 27 werden potenzielle Geschäftsfelder des Eigentümers dargestellt.

Eigentümer		Produktlebenszyklusphase		
		vor Erstnutzung	Nutzungsphasen	nach letzter Nutzungsphase
LCU-Dienst	Anpassungsdaten	-	Auswahl von Anpassungsoptionen	-
	Added Value	Produktsicherheit und -nutzung, Umwelt- und Steuerrecht	Verbesserung und Entwicklung von Nutzungsmodellen	
	Qualitätssicherung	-	Sicherung von Qualität während Nutzungsphase	-
	Beweislastsicherung	-	Ansprüche aus Produkthaftung	-

Tabelle 27: Geschäftsfelder des Eigentümers

#### 4.8.1.4 Nutzer

Die Abgrenzung des Nutzers vom Eigentümer ist unter Zuhilfenahme der bereits diskutierten Verfügungsrechte möglich. Generell hat der Nutzer das Recht zur Nutzung des Produktes (Usus). Dieses Recht kann um das Recht zur Nutzung zwecks Aneignung von Gewinnen und Verlusten (Usus fructus) erweitert sein. Der Nutzer hat grundsätzlich weder das Recht zur formalen und materiellen Änderung des Produktes, noch besitzt er das Recht zu dessen Veräußerung. Die Vorteile der LCU-Dienste für Produkte sind dem Nutzer nicht ohne Weiteres erkenntlich. Der Nutzen, der durch Anpassung erzielt wird, kann im Fall einer Modernisierung oder Erweiterung um zusätzliche Anwendungen sofort wahrgenommen werden. Häufig liegt der Nutzen, der beispielsweise von Instandhaltungsmaßnahmen ausgeht, jedoch im zukünftigen Gebrauch des Produktes. Ähnliche Vorteile lassen sich für die anderen LCU-Dienste ableiten. Der LCU-Dienst Beweislastsicherung tritt erst dann ins Bewusstsein der

Interessengruppen, wenn sie mit einem Schadensfall konfrontiert werden. Die durch den LCU-Dienst Qualitätssicherung bereitgestellten QS-Informationen aus der Nutzungsphase müssen über einen langen Zeitraum bei einer großen Anzahl von Produkten erhoben werden. Erst dann sind sie für Hersteller oder Produktrecycler zur Verbesserung von Produkten und Prozessen anwendbar. In Tabelle 28 werden potenzielle Geschäftsfelder des Nutzers dargestellt.

Nutzer		Produktlebenszyklusphase		
		vor Erstnutzung	Nutzungsphasen	nach letzter Nutzungsphase
LCU-Dienst	Anpassungsdaten	-	-	-
	Added Value	Produktsicherheit und -nutzung, Umwelt- und Steuerrecht	Instruktion	-
	Qualitätssicherung	-	Sicherung von Qualität während Nutzungsphase	-
	Beweislastsicherung	-	Ansprüche aus Produkthaftung	-

Tabelle 28: Geschäftsfelder des Nutzers

#### 4.8.2 Geschäftsfelder des Beispielprodukts Waschmaschine

Durch die Kombination der vier LCU-Dienste Anpassungsdaten, Qualitätssicherung, Beweislastsicherung und Added Value mit den vier Interessengruppen Produktrecycler, Hersteller, Eigentümer und Nutzer ergeben sich mindestens 40 potentielle Geschäftsfelder je Produkt. Diese Anzahl gilt für Paare von Interessengruppen, d.h. wenn jeweils nur zwei Interessengruppen ein Geschäftsfeld in einem LCU-Dienst sehen. Beispielsweise können Produktrecycler und Hersteller auf dem Gebiet der Anpassung zusammenarbeiten. Bei Mehrfachinteresse von Interessengruppen an einem oder gar mehreren LCU-Diensten steigt die Anzahl potentieller Geschäftsfelder. Beispielsweise könnten Produktrecycler, Hersteller und Eigentümer auf dem Gebiet der Qualitätssicherung zusammenarbeiten. In Tabelle 29 werden die 40 potenziellen Geschäftsfelder der Waschmaschine evaluiert, die sich ergeben, wenn die Interessengruppen paarweise innerhalb eines LCU-Dienstes kooperieren.

Die Möglichkeiten des netzwerkweiten Austauschs von Produktlebenslaufdaten und Nutzerprofilen zwischen Produktrecyclern eignet sich besonders bei Produkten, die

in großer Stückzahl produziert und dezentral genutzt bzw. angepasst werden. Die lange Nutzungszeit von Waschmaschinen und hohe Stückzahlen führen zu einem hohen Bestand an grundsätzlich wiederverwendbaren Komponenten. Dieses Potenzial kann für ein überregionales Ersatzteilemanagement wiederverwendeter Komponenten genutzt werden. Hierzu sind sowohl Informationen über Menge und Ort der Komponenten als auch genaue Daten zu deren nutzungsbedingtem Produktzustand erforderlich. Durch ein solches Ersatzteilemanagement entsteht nach dem Ende der letzten Nutzungsphase einer Maschine ein zusätzlicher Wert („Added Value“) für den Nutzer. Mit seinen „privaten“ von der LCU aufgezeichneten Nutzungsdaten kann der Zustand der Komponenten bewertet werden. Nutzer können ihr Gerät so unter Einsatz nutzungsspezifischer Informationen ertragswirksamer am Markt veräußern.

	<b>Anpassung</b>	<b>Added Value</b>	<b>Qualitäts-sicherung</b>	<b>Beweislast-sicherung</b>
<b>PP</b>	Produktlebenslauf zur Abschätzung des Nutzens der Anpassung sowie zur Optimierung der Anpassung	Austausch von Kundenstammdaten z.B. zur Preisbildung sowie Auftragsplanung und -steuerung	Produktlebenslauf und Nutzerprofil für Lebensdauermodell	Datenbank der Schadensfälle angepasster und veräußerter WM sowie Befundsicherung zur Abwehr von Ansprüchen aus Gefährdungs- und deliktischer Haftung
<b>PH</b>	leichtere Anpassung durch Anpassungsplan, Demontage durch aktorische Verbindungselemente; verbesserte Ersatzteildisposition; verbesserte Anpassung einem Hersteller zuliefernden Produktrecycler durch netzwerkweite Produktlebensläufe; schnelle, eindeutige Fehlerdiagnose	Hersteller betreibt Ersatzteillager, Ausrichtung zukünftiger Anpassungsprozesse wie z.B. Demontageanlagen an Ausmaß der durch WM bereitgestellten Informationen	Produktlebenslauf und Nutzerprofile zur Produktverbesserung sowie für Zuverlässigkeitsmodell; Abnutzungsdaten für Hersteller	Befundsicherung zur Abwehr von Ansprüchen aus deliktischer Haftung
<b>PE</b>	Produktlebenslauf für Produktrecycler zur Verbesserung der Anpassung wie z.B. verbesserter Schutz vor Totalausfällen, zeitwertgerechte Instandhaltung; schnelle und eindeutige Fehlerdiagnose	Evaluierung des Kostensenkungspotenzials auf Basis von historischen Anpassungs- und Abnutzungsdaten; späterer Neukauf durch optimale Instandhaltung	vernetzte Nutzerprofile für Bildung und empirische Validierung von Lebensdauermodellen	Dokumentation der Anpassung; Dokumentation der Befundsicherung aufgearbeiteter Ersatzteile zur Abwehr von Ansprüchen aus Gefährdungs- und deliktischer Haftung
<b>PN</b>	Abnutzungsdaten für Produktrecycler zur Optimierung des Anpassungspotenzials; schnelle, eindeutige Fehlerdiagnose	wie PE	wie PE	Nutzer meldet Eigentümer Abnutzung
<b>HH</b>	-	Zulieferernetzwerk aus Komponentenlieferanten und Endhersteller; Verbesserung neuer WM auf Basis bereitgestellter netzwerkweiter Abnutzungs- und Anpassungsdaten	Optimierung der Herstellung aktueller und zukünftiger WM auf Basis von Nutzerprofilen und Abnutzungsdaten	Datenbank mit Schadensmeldungen aus passiver und aktiver Produktbeobachtung, Befundsicherung zur Abwehr von Ansprüchen aus deliktischer Haftung

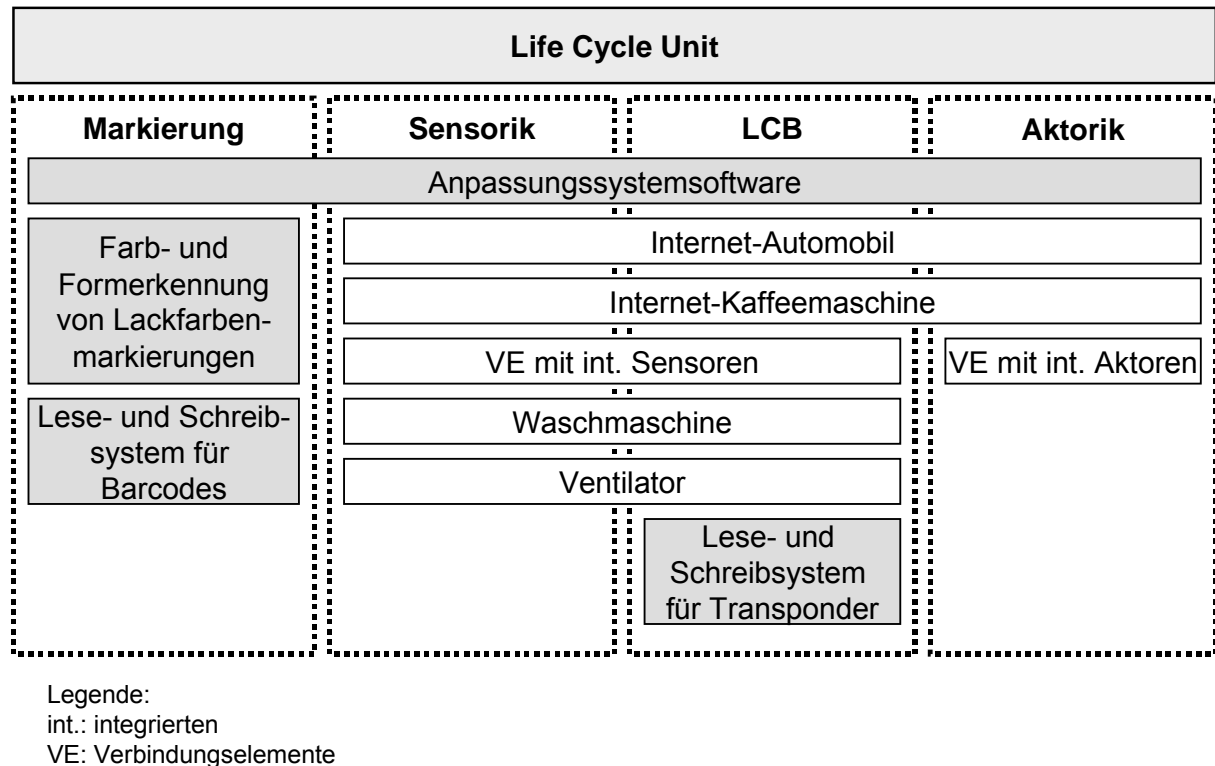
**Tabelle 29:** Evaluierung potenzieller Geschäftsfelder der Waschmaschine für Paare von Interessengruppen (PP, PH, PE, PN, HH) mit:  
P: Produktrecycler; H: Hersteller; E: Eigentümer; N: Nutzer  
(Fortsetzung in Tabelle 30)

	<b>Anpassung</b>	<b>Added Value</b>	<b>Qualitäts-sicherung</b>	<b>Beweislast-sicherung</b>
<b>HE</b>	verbesserter Anpassungsplan für WM auf Basis von Produktlebenslaufdaten und Nutzerprofilen; längere Produktlebensdauer durch verbesserte Instandhaltung; schnelle und eindeutige Fehlerdiagnose	Verbesserung des Vertriebs und der Logistik durch Bereitstellung von Nutzungsprofilen und Produktlebensläufen; Anpassung der Produktpalette und Produktmerkmale aufgrund der Kundenwünsche; geringere Unfallfolgekosten durch Produktzustandsüberwachung	Verbesserung der Herstellung aktueller und zukünftiger WM auf Basis von Nutzerprofilen und Abnutzungsdaten des Eigentümers	Befundsicherung zur Abwehr von Ansprüchen aus deliktischer Haftung, Gefährdungshaftung und ggf. Ansprüchen aus vertraglicher Haftung
<b>HN</b>	verbesserter Anpassungsplan für WM auf Basis von Produktlebensläufen und Nutzerprofilen; schnelle und eindeutige Fehlerdiagnose	Steuerung und Fernsteuerung der WM; geringere Unfallfolgekosten durch Produktzustandsüberwachung	Verbesserung der Herstellung aktueller und zukünftiger WM auf Basis von Nutzerprofilen und Abnutzungsdaten des Nutzers	Befundsicherung zur Abwehr von Ansprüchen aus deliktischer Haftung und Gefährdungshaftung
<b>EE</b>	Nutzerprofile und Produktlebenslaufdaten aus vernetzten WM für Anpassung	Rückschluss auf die Restlebensdauer der WM durch bereitgestellte Nutzerprofile und Produktlebensläufe	vernetzte Nutzer- und Produktlebensläufe zur Qualitätsverbesserung	Befundsicherung zur Abwehr von Ansprüchen aus deliktischer Haftung, Gefährdungshaftung und Ansprüchen aus vertraglicher Haftung
<b>EN</b>	Nutzerprofil zur Umlage der Kosten für Anpassung; schnelle und eindeutige Fehlerdiagnose	Nutzerprofil zur Umlage der Kosten für Anschaffung und Versicherung	Bereitstellung von Nutzerprofilen und Produktlebensläufen zur Qualitätsverbesserung	Befundsicherung zur Abwehr von Ansprüchen aus deliktischer und Gefährdungshaftung sowie Ansprüchen aus Vertragsrecht
<b>NN</b>	Nutzerprofile und Produktlebensläufe aus vernetzten WM für optimierte Anpassung	Nutzungsprofile und Produktlebensläufe aus vernetzten WM für verbesserte Produktentwicklung, Vertrieb, Logistik und Marketing	Nutzerprofile und Produktlebensläufe aus vernetzten WM für verbesserte Qualitätssicherung	Datenbank für Schadensfälle zur Absicherung von Ansprüchen aus deliktischer Haftung, Gefährdungshaftung und vertraglicher Haftung

**Tabelle 30:** Evaluierung potenzieller Geschäftsfelder der Waschmaschine für Paare von Interessengruppen (HE, HN, EE, EN, NN) mit:  
P: Produktrecycler; H: Hersteller; E: Eigentümer; N: Nutzer  
(Fortsetzung der Tabelle 29)

## 5 Realisierung

In Bild 51 sind die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten und realisierten Produkte mit integrierter LCU sowie Komponenten des Anpassungssystems dargestellt. Nach einer kurzen einleitenden Vorstellung der einzelnen Realisierungen werden sie ausführlich in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.



**Bild 51:** realisierte LCU-Produkte (weiß hinterlegt) und Komponenten des Anpassungssystems (grau hinterlegt)

Die Anpassungssystemsoftware ist ein Softwareprogramm zur Verwaltung des Systems LCU und der LCU-Systemkomponenten. Die Software dient sowohl einem Produktentwickler als Konfigurationswerkzeug zur Integration einer LCU in ein neues Produkt als auch einem Produktanwender als Werkzeug zur Bereitstellung von Anpassungsdaten. Für das Anpassungssystem wurde eine Bilderkennungs- und -auswertungssoftware zur Erkennung von in Farbe und Form variierenden Lackfarbenmarkierungen entwickelt. Zum Lesen von ein- und zweidimensionalen Barcodes sowie zusätzlich zum Schreiben von LCBs, die als Transponder ausgeführt sind, wurden Schreib-/Leseeinheiten des Anpassungssystems implementiert. Auf Basis der Kombinationsmöglichkeiten aus Kapitel 4.4 wurden einige LCU-Auslegungen realisiert, um Erfahrungen im Zusammenspiel der Untersysteme und Komponenten des Anpassungssystems zu sammeln, neue Anwendungsfelder zu erschließen und neue Elemente von Untersystemen wie z.B. Aktoren in Verbindungselementen prototypisch umzusetzen. Durch das Untersystem Sensorik wird der Produktzustand einer Waschmaschine erfasst und mit Hilfe eines LCB zum Lebenslauf der Wasch-



maschine generiert. Weiterhin werden am Produkt Waschmaschine die Elemente Lackfarbenmarkierungen und Barcodes des Untersystems Markierung demonstriert. Um die Demontage zu automatisieren, wurden Schnappverbindungen mit integrierten magnetostatischen Aktoren am Beispiel von Gehäuseelementen entwickelt. Dieses Verbindungselement wird am Beispiel eines Gehäuseversuchsstandes demonstriert. Für die Ferndiagnose und -instandhaltung von Produkten über das Internet wurde in die Produkte Automobil und Kaffeemaschine jeweils eine LCU integriert. Im Falle des Automobils erfolgt die Datenübertragung über Funk. Für die Erfassung des Produktzustands von Verbindungselementen wurden in das am häufigsten eingesetzte Verbindungselement Schraube Sensoren integriert, die Produkt- und Produktumweltinformationen erfassen. Damit können Versagensfälle von Verbindungselementen frühzeitig erkannt und Störfälle vermieden werden. Für Kleinventilatoren wie z.B. PC- oder Mikroprozessor-Kühler wird der Lagerverschleiß überwacht, der sich durch die Symptome Temperaturerhöhung des Lagers und Herabsetzung der Drehzahl ankündigt. Der Ausfall der Ventilatoren kann eine Beschädigung der zu kühlenden Komponenten nach sich ziehen und damit die Ursache erheblicher Schäden sein. Zur präventiven Detektion des Ausfalls wurde eine kostengünstige LCU bestehend aus einem kostengünstigen LCB und zwei Sensoren entwickelt.

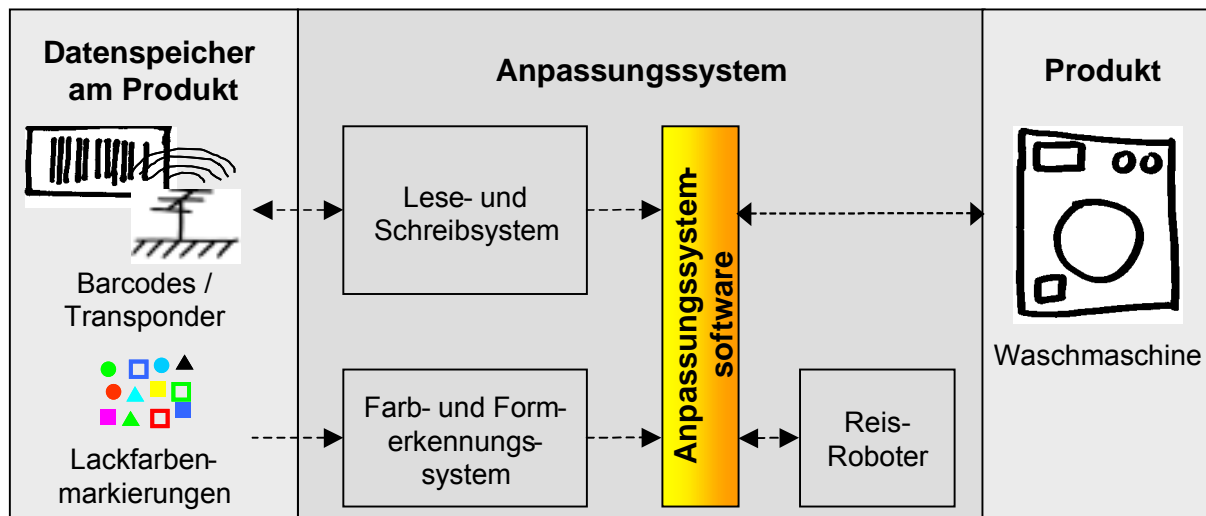
Für die Elektronikentwicklung der einzelnen LCUs, Peripherieschaltungen der Sensoren und Aktoren sowie Softwareentwicklungen wurden folgende Werkzeuge benutzt:

- Cadsoft Eagle Versionen 3.53d und 4.03 (Schaltpläne, Platinenlayout),
- VBA Versionen Access 97 und Access 2000 von Microsoft,
- Borland Builder C++ 5.0,
- Lab View Versionen 3.0 und 5.0 von National Instruments,
- ST6 Realizer von SGS Thompson,
- microSysC167 Version 1.0 von Hightec/PLS und
- Grundig Digimess Version 1.0 Software Workshop.

## **5.1 Anpassungssystemsoftware**

Die Anpassungssystemsoftware ist modular konzipiert und in der Datenbankentwicklungsumgebung Microsoft Access programmiert. In einer ersten Implementierungsstufe verwaltet sie die LCU der Waschmaschine. Mit Hilfe von Lackfarbenmarkierungen, Barcodes und Transponder-LCBs gespeicherte Informationen werden durch die Anpassungssystemsoftware bereitgestellt. Als Output werden Ansteuerdaten für ein Anpassungssystem bestehend aus einem Portalroboter der Firma Reis Typ RL25 generiert (Bild 52). Der Roboter wird über eine in C++ und Assembler geschriebene Softwareschnittstelle als DLL und eine entwickelte Hardwareschnittstelle zur Pegelanpassung angesteuert und führt die Prozesse der Anpassung aus. So

werden per Barcode gespeicherte Demontagepläne erfasst und zu Ansteuerdaten für den Roboter verarbeitet, damit dieser das Produkt demontieren kann.



Legende:

.....> Anpassungsdaten

**Bild 52:** Aufgaben der Anpassungssystemsoftware

## 5.2 Farb- und Formerkennung von Lackfarbenmarkierungen

Die preiswerteste Art Informationen zu speichern bieten Lackfarbenmarkierungen unterschiedlicher Farbe und Form. Mit Hilfe von Markierungen kann entweder eine geringe Informationsmenge wie z.B. Konturen und Positionen gespeichert werden oder sie dienen zur indirekten Kennzeichnung eines anderen Speichers wie z.B. eines Barcodes, dessen Position durch die Lackfarbenmarkierung gespeichert wird.

Zur Erfassung und Erkennung von Lackfarbenmarkierungen wurde ein Farbbildverarbeitungssystem in C++ entwickelt und implementiert. Als Plattform dient ein PC (Pentium II 266MHz) mit programmierbarer Bilderfassungskarte (MV Sigma-SLG) sowie eine CCD Farbkamera. Die Farbkamera erfasst aus drei Meter Entfernung mit einem 8.5mm 1:1.5 Objektiv ein Bild einer Waschmaschinenseitenwand. Das Farbbild wird in Form von drei Matrizen im Speicher der Bilderfassungskarte abgelegt. Die Matrizen enthalten die drei Intensitäten für Rot, Grün und Blau (RGB-Farbmodell). Alle drei Matrizen sind 600x600 Pixel groß. Die Auflösung der Intensitäten für Rot, Grün und Blau beträgt 8 Bit (256 Stufen), so dass insgesamt  $256^3$  Farben dargestellt werden.

Die Lackmarkierungen werden entweder einzeln oder in Gruppen ausgewertet. Einzelnen können sie zum Beispiel Auskunft über Demontagewerkzeuge oder zu demontierende Komponenten wie Verbindungselemente geben. In Gruppen stellen sie geschlossene Konturen dar. Die Codierung der mit Lackfarbenmarkierungen gespeicherten Informationen ist in Tabelle 31 dargestellt.

Farbe Form	Rot	Gelb	Grün	Blau	Schwarz
<b>Dreieck</b> (Datenspeicher)	linearer Barcode Code 39	linearer Barcode Code 128	Matrixcode	elektroni- scher Spei- cher	gestapelter Barcode
<b>Kreis</b> (Schraube)	DIN 85	DIN 933	DIN 934	DIN 7981	DIN 7985
<b>Rechteck</b> (Kontur)	Trennen mit Wasser- strahl	Trennen mit Plasmastrahl	Trennen mit Flex	Trennen mit Schere	Trennen mit Säge
<b>Rechteck mit Loch</b> (Schnapp-verbin- dung)	Vierteldreh- Verschluss	Druck-Dreh- Verschluss	Druck-Druck- Verschluss	Kreis-Keil- Profil	-

Tabelle 31: Codierung von Informationen mit Lackfarbenmarkierungen

Die Erkennung basiert zum größten Teil auf dem HSI-Modell. **H** (Hue) steht für die Färbung und ist ein Maß für die sichtbare dominante Farbe. **S** (Saturation) steht für die Sättigung und beschreibt die „Verdünnung“ der Farbe mit der Farbe „weiß“. **I** (Intensity) steht für die Intensität und beschreibt die relative Helligkeit. Sie ist farzunabhängig und korrespondiert mit der Graustufenwiedergabe eines Bildes. Die H-, S- und I-Anteile sind in Form von drei Matrizen im Speicher abgelegt. Die gesamte Erkennung und Auswertung der Lackfarbenmarkierungen erfolgt mit Hilfe eines im Speicher der Bilderfassungskarte gespeicherten Farbbildes der Waschmaschine. Dabei werden die Lackfarbenmarkierungen zuerst nach der Form und anschließend nach der Farbe ausgewertet.

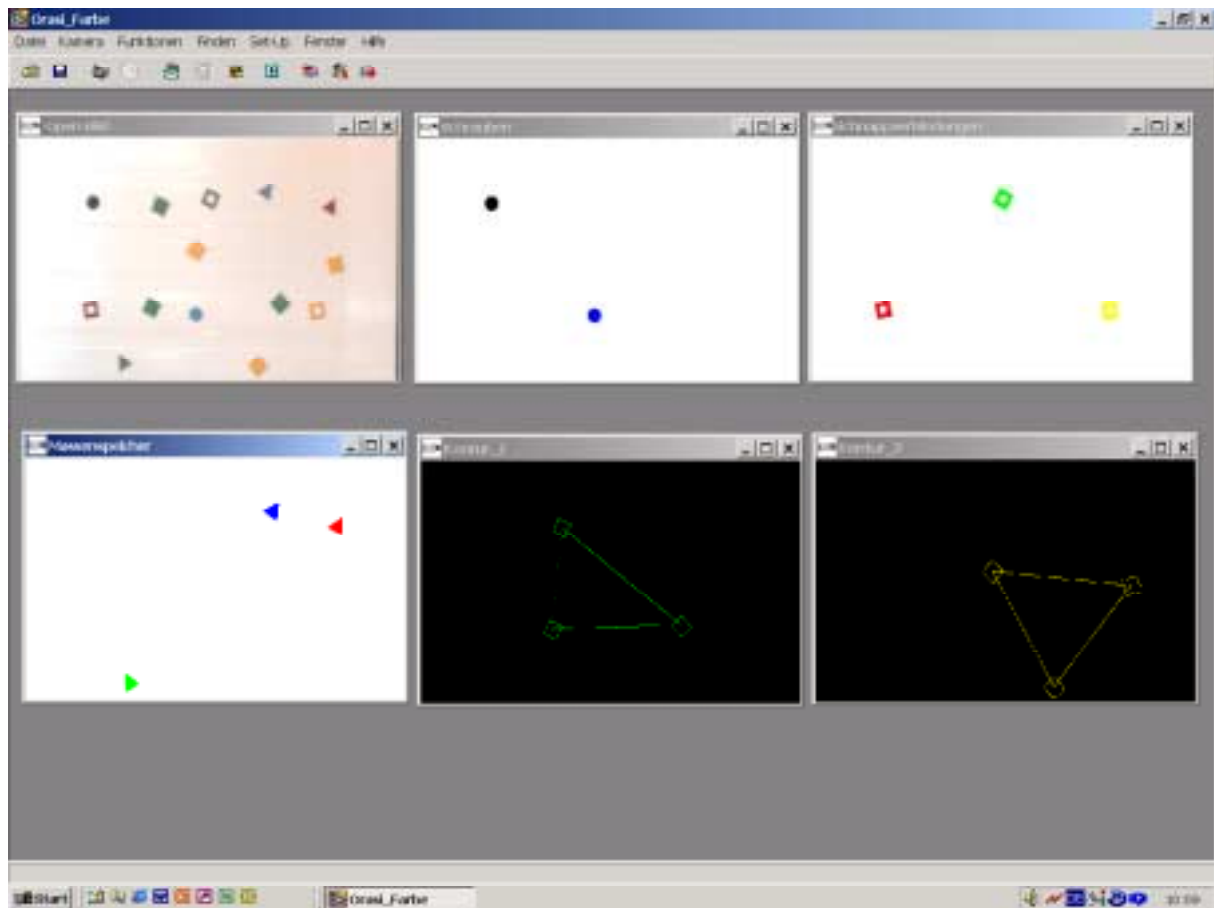
### 5.2.1 Formerkennung

Da die Farbe nicht zu den geometrischen Eigenschaften der Lackfarbenmarkierungen gehört, wird die Form aus dem korrespondierenden Graubild des Farbbildes ermittelt. Das Graubild entspricht dem I-Anteil des in das HSI-Modell transformierten RGB-Farbbildes. Um den Hintergrund zu isolieren, wird das Graubild mit einem Schwellwert binarisiert. Der Schwellwert hängt von der Farbe der zu erkennenden Lackfarbenmarkierung ab. So wird z.B. für die Farbe „gelb“ ein niedrigerer Schwellwert als für die Farbe „rot“ benötigt. Das Binärbild enthält verschiedene zusammenhängende Pixelbereiche, die die Lackfarbenmarkierungen bilden. Um die verschiedenen Bereiche bzw. Lackfarbenmarkierungen zu extrahieren, wird der Blob-Coloring-Algorithmus [BAL-82] verwendet. Dabei werden zuerst alle Pixel, die nicht zum Hintergrund gehören, einem sog. Label zugeordnet. In einem weiteren Schritt

wird das Label überprüft, so dass alle Pixel, die zu dem selben Bereich einer Form gehören, den gleichen Label erhalten. Die verschiedenen Label entsprechen den Lackfarbenmarkierungen. Die Position einer Lackfarbenmarkierung wird aus den Koordinaten des Schwerpunktes ermittelt. Für die Erkennung der Lackfarbenmarkierungen werden die geometrischen Merkmale Fläche, Umfang, Kompaktheit, Formfaktor, Roundness und polarer Abstand verwendet. Diese Merkmale bilden einen mehrdimensionalen Merkmalsraum. Da Lackfarbenmarkierungen gleicher Art geometrisch sehr ähnlich zueinander sind, wird der Minimum-Distance-Klassifikator [LEH-97] verwendet. Der Minimum-Distance-Klassifikator ist ein überwachter Algorithmus, er benötigt also eine Lernphase. Bei der Lernphase werden die verschiedenen Klassen der Lackfarbenmarkierungen durch statistische Messungen der oben genannten Merkmale gebildet. Als Distanzmaß für die Klassifikation dient dann die Euklidische Distanz. Das bisher implementierte prototypische System kann vier Formen in beliebiger Kombination und Anzahl voneinander trennen.

### 5.2.2 Farbe

Die Farberkennung wird nur für die zuvor erkannten Formen durchgeführt. Hierfür werden die drei Masken des RGB-Modells verwendet. Alle Pixel einer Lackfarbenmarkierung werden einer Farbe zugeordnet. Die Zuordnung einer Farbe stellt dabei eine Klassifikation dar, wobei der Merkmalsraum dreidimensional (R,G,B) ist. Die Abbildung der Farbe hängt sehr stark von der Ausleuchtung des Objektes ab. Bei konstanten Beleuchtungsverhältnissen kann der Minimum-Distance-Klassifikator [LEH-97] verwendet werden. Eine Lernphase ist für die Initialisierung des Klassifikators erforderlich. Aus der Häufigkeit der Farbwerte aller Pixel einer Lackfarbenmarkierung wird ihre Farbe bestimmt. Das implementierte System kann fünf Farben unterscheiden. In Bild 53 ist die Oberfläche des Bildverarbeitungsprogramms zur Farb- und Formerkennung von Lackfarbenmarkierungen mit erkannten und decodierten Informationen dargestellt.



**Bild 53:** Oberfläche des Bildverarbeitungsprogramms mit decodierten Informationen in folgender Reihenfolge von links oben nach rechts unten: Markierungen auf Seitenwand der Waschmaschine, Schrauben, Schnappverbindungen, Datenspeicher, Kontur 1, Kontur 2

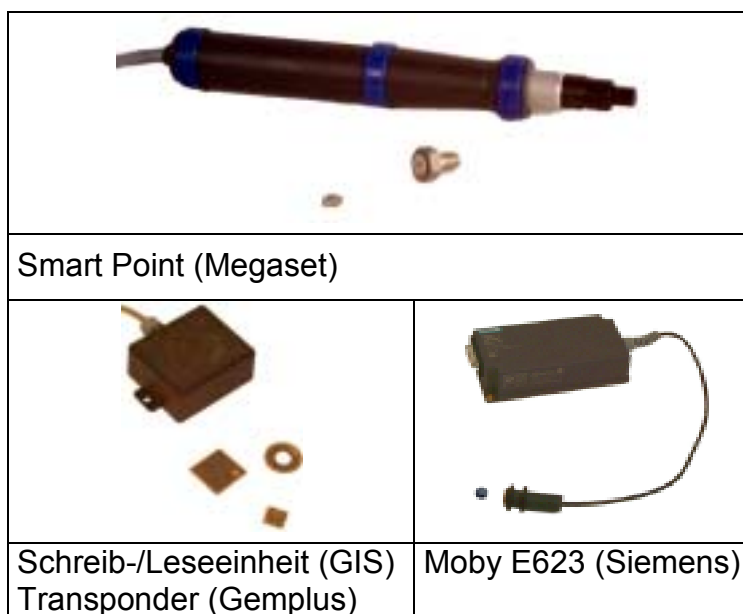
### 5.2.3 Konturen

Für die Berechnung der Konturen wird ein Entscheidungsalgorithmus eingesetzt. Die Konturen werden aus mehreren Rechteckmarkierungen gebildet. Wurden die Rechtecke in Farbe und Anzahl erfasst, wird die geschlossene Kontur generiert. Hierzu wird zuerst ein Rechteck zufällig ausgewählt und dessen Abstand vom gemeinsamen Zentrum der restlichen Rechtecke ermittelt. Das Nachbarrechteck mit dem kleinsten Abstand wird als nächstes selektiert und mit dem ersten verbunden. Diese Prozedur wird solange fortgesetzt, bis kein Rechteck mehr vorhanden ist. Aus den geschlossenen Konturen werden die Trajektorien des Roboters zur Führung von Demontagewerkzeugen generiert. Die Farbe der Kontur bestimmt dabei das zu verwendende Werkzeug.

## 5.3 Lese- und Schreibsystem für Barcodes und Transponder

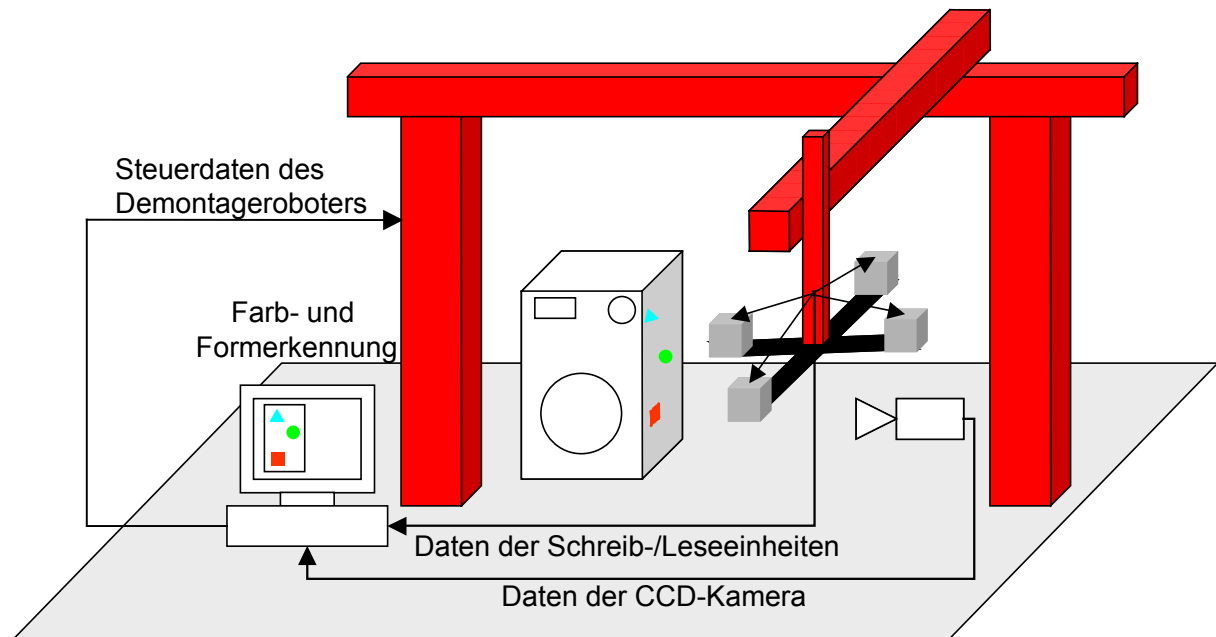
Zur produktbegleitenden und preisgünstigen Speicherung von kleinen Datenmengen können im LCU-Konzept neben elektronischen Speichern auch Barcodes verwendet

werden. Immerhin können mit Barcodes mehr als 7000 Zeichen dargestellt werden. Damit sind Barcodes hervorragende Speicher für statische Daten wie z.B. einen Demontageplan preisgünstiger Produkte. Wird das LCB mit einer drahtlosen Schnittstelle ausgeführt, so ist es ein Transponder (Kapitel 2.5.3). Zum Schreiben und Lesen von Transpondern sowie zum Lesen von Barcodes wurde ein System entwickelt, das drei verschiedene Transpondertypen berührend und berührungslos sowie alle gängigen ein- und zweidimensionalen Barcodes schreiben und lesen kann. Dazu wurden die Softwaretreiber handelsüblicher Schreib-/Leseeinheiten für Barcodes und Transponder zur Einbindung in die Anpassungssystemsoftware angepasst. Alle Schreib-/Leseeinheiten wurden in einem Trägermodul vereinigt (Bild 56). Die bisher im LCU-Konzept als LCB implementierten Transponder sind in Bild 54 abgebildet.



**Bild 54:** Unterstützte Transpondertypen

Da die Speichermenge bei Barcodes im Wesentlichen von den Abmaßen und von der Auflösung des gedruckten Barcodes abhängt, ist die maximale Datenmenge im hier implementierten System auf 300 ASCII-Zeichen limitiert. Die von den Herstellern gelieferten Algorithmen zum Lesen und Schreiben wurden um weiterführende in Visual Basic implementierte Algorithmen zur Kommunikation mit verschiedenen seriellen Schnittstellen eines PC zur Nutzung des gesamten Datenbereiches der Transponder und zum Dateiaustausch mit einem PC ergänzt. Zum Lesen und Schreiben muss dem System die Position bekannt sein. Hierzu sind die Speicher (Barcode und Transponder) mit Lackfarbenmarkierungen gekennzeichnet (Bild 56 rechts), so dass deren Position mit geringem Aufwand vom System zur Farb- und Formerkennung von Lackfarbenmarkierungen erkannt werden kann. In Bild 55 ist die Gesamtstruktur des Lese- und Schreibsystems für Barcodes und Transponder dargestellt.



**Bild 55:** Gesamtstruktur des Lese- und Schreibsystems für Barcodes und Transponder

In den nächsten zwei Bildern sind einzelne Komponenten sowie das Gesamtsystem abgebildet. Dieses besteht aus einer Farb-CCD-Kamera, Leuchtmittel zur Ausleuchtung der Szene, dem Trägermodul für Schreib-/Leseeinheiten, dem Roboter sowie einem PC mit Monitor und Bildverarbeitungssoftware sowie der Anpassungssystemsoftware.



**Bild 56:** Komponenten des Lese- und Schreibsystems für Barcodes und Transponder (Fortsetzung in Bild 57)

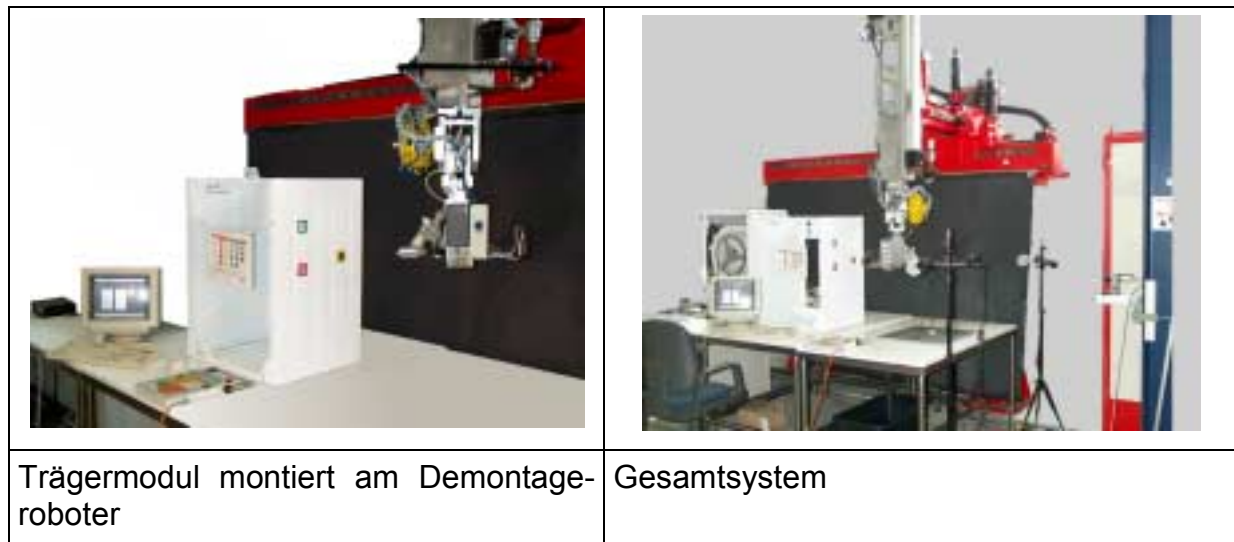


Bild 57: Gesamtsystem des Lese- und Schreibsystems für Barcodes und Transponder (Fortsetzung aus Bild 56)

#### 5.4 Waschmaschine

Für einen Waschautomat vom Typ Toplader WOK 2031 der Firma Bosch-Siemens wurde eine LCU bestehend aus den Untersystemen Sensorik und LCB implementiert, um Produktzustand und Produktlebenslauf zu erfassen, zu speichern und ggf. zu übertragen. Folgende Messgrößen werden erfasst:

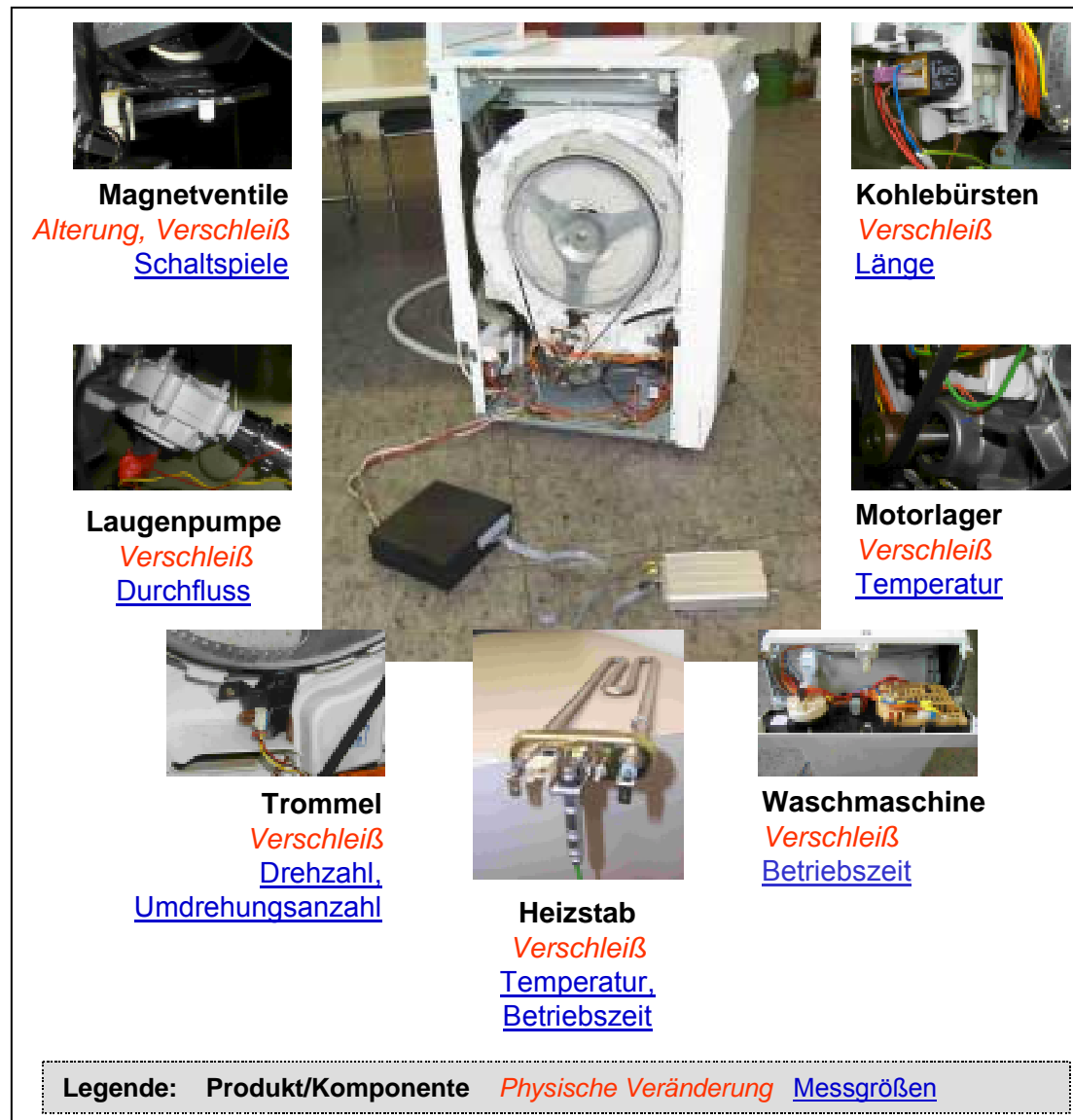
- Kohlebürstenlänge,
- Heizstabtemperatur,
- Motorlagertemperatur,
- Laugenpumpendurchfluss,
- Schaltspiele Magnetventile,
- Trommeldrehzahl,
- Trommelumdrehungen,
- Maschinenbetriebszeit und
- Heizstabbetriebszeit.

Mit diesen Messgrößen werden diejenigen Komponenten überwacht, die nach [MÜL-01] zu 68,3 % der Ausfälle von Waschmaschinen führen. Zur Messung dieser Größen wurden Sensoren ausgewählt oder entwickelt. Zusätzlich wurden Messschaltungen zur Signalkonditionierung der Sensoren entworfen und aufgebaut. Durch eine Signalvorverarbeitung werden die Sensorsignale an den Eingangsbereich des Mikrocontrollers angepasst. Je nach Art des jeweiligen Eingangssignals kann eine Messcharakteristik definiert werden, die durch entsprechende Programmierung des Mikrocontrollers das Eingangssignal verarbeitet. Der als LCB verwendete Mikrocont-



roller  $\mu\text{C167}$  von Siemens verfügt über einen Datenspeicher von 1 MByte. Damit kann der Lebenslauf der Waschmaschine maximal fünf Monate gespeichert werden. Sollen längere Zeiträume gespeichert werden, so müssen die Daten in einen externen Speicher übertragen werden. Die gesamte Konfiguration des Mikrocontrollers wie z.B. Messcharakteristik, Messzyklen, Grenzwerte und zu verwendende Sensoren wird mit Hilfe der Anpassungssystemsoftware aus Kapitel 5.1 durchgeführt.

Die zwei Kohlebürsten des Universalmotors werden von einer Spiralfeder an den Anker gedrückt und stellen ein Maß für dessen Wieder- oder Weiterverwendungsfähigkeit dar. Ihre Länge wird über einen Linearpotentiometer, der mit den Kohlebürsten verbunden ist, gemessen. Dazu wurde ein Linearpotentiometer der Fa. Alps mit einem Betätigungsweg von 30mm entsprechend der aktiven Länge der Kohlebürste eingesetzt. Es hat einen linearen Widerstandsanstieg bis 50 k $\Omega$ . Mit einer Reihenschaltung aus einem 5,1 k $\Omega$  Widerstand und dem Linearpotentiometer wurde eine einfache Messschaltung für jede Kohlebürste aufgebaut. Der Heizstab darf nur in Betrieb genommen werden, wenn er von Wasser umgeben ist. Das Wasser kühlt den Heizstab und verhindert so eine Überhitzung. Ist beim Betrieb kein Wasser in der Waschtrommel, kommt es zur unmittelbaren Zerstörung des Heizstabes. Der Temperaturverlauf am Heizstab selbst ist also ein Indikator für dessen Lebensdauer. Aufgrund der schlechten Zugänglichkeit und der erforderlichen elektrischen Isolierung wurde zur Messung der Heizstabtemperatur ein Mantelthermoelement (Fa. Thermo-coax Typ K) ausgewählt. Es hat einen Temperaturmessbereich bis 1000°C und einschließlich Schutzmantel des Thermopaars einen Durchmesser von nur 1mm. Als Messverstärker wird der IC-Typ AD595 von Analog Devices verwendet, da dieser speziell für Thermoelemente vom Typ K abgeglichen ist. Die Eingangsspannung des Thermoelements wird von 40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  auf 10mV/ $^\circ\text{C}$  verstärkt. Gleichzeitig wird die Nichtlinearität des Signals kompensiert. Die Motorlagertemperatur wird mit Hilfe eines Metallwiderstandsthermometers vom Typ PT1000, das in die in Dreileitertechnik aufgebaute Messschaltung integriert ist, erfasst. In Bild 58 ist die LCU mit allen beschriebenen Messstellen, physischen Veränderungen und Messgrößen dargestellt.



**Bild 58:** LCU der Waschmaschine mit Messstellen, physischen Veränderungen und Messgrößen

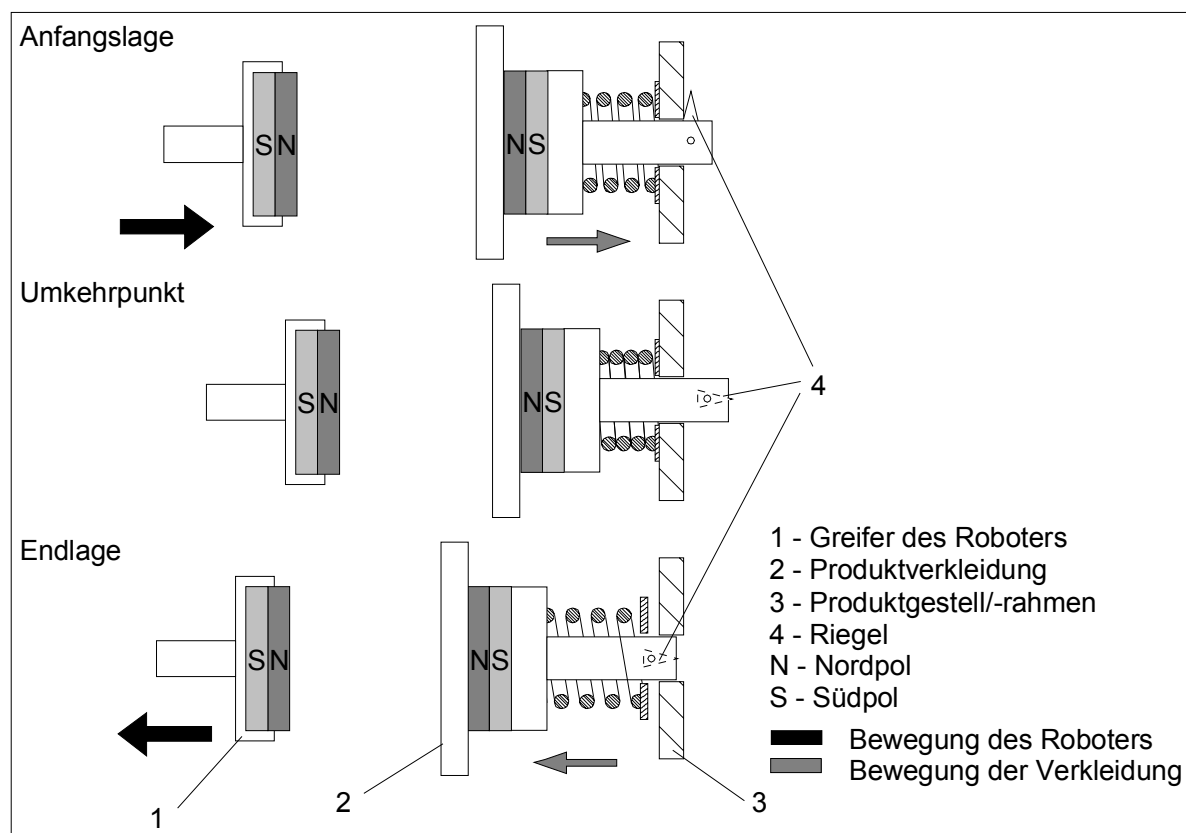
Die Flussgeschwindigkeit des Abwassers beschreibt den Zustand von Ablaufpumpe und Schlauchsystem der Waschmaschine. Ist die Pumpe defekt oder verstopft, wird sich ihre Förderleistung reduzieren. Mit einem Durchflussmesser lässt sich der Pumpendurchfluss pro Zeiteinheit bestimmen. Dazu wird ein Sensor der Firma Digmesa (Typ FM, 300 Impulse pro Liter) im Wasserrücklaufsystem verwendet. Der Open-Collector-Ausgang des Sensors ist mit einem externen Pull-Up-Widerstand (4,7 kΩ) und einem Schutzwiderstand an einen Analogeingang des Mikrocontrollers angeschlossen. Der Mikrocontroller bestimmt durch eine Impulsabstandsmessung die momentane Flussgeschwindigkeit. Der Frischwasserzulauf einer Waschmaschine wird, aufgeteilt nach den Kammern für Waschzusatzstoffe, über 2 Magnetventile angesteuert. Ihre Haltbarkeitsdauer ist hauptsächlich von der Anzahl der Schaltspiele abhängig. Durch Erfassung der Schaltspielanzahl kann deshalb ein Erwartungswert für die Restlaufzeit bestimmt werden. Die Magnetventile werden mit 230V Wechsel-

spannung betrieben. Zur Zustandserkennung mittels LCU wird die anliegende Wechselspannung in eine durch das LCB zu erfassende Gleichspannung mit einem Pegel von 5V gewandelt. Wird diese Zustandserkennung jedoch nicht nachträglich ergänzt, sondern bereits bei der Entwicklung der Waschmaschinen eingeplant, so lässt sich der hier noch betriebene schaltungstechnische Aufwand vermeiden, indem die  $\mu$ C-Eingangssignale direkt von der Steuerung der Waschmaschine geliefert werden. Die Signalzustände beider Magnetventile werden mit dem Polling-Verfahren überwacht. Dabei wird in einer Programmschleife regelmäßig der momentane Zustand abgefragt. Die Zustandsänderung ‚Schaltvorgang des Magnetventils‘ der Eingänge wird durch Inkrementierung des zugehörigen Zählers erfasst. Die Trommeldrehzahl wird mit einem Hall-Sensor der Fa. Allegro MicroSystems Typ A3121EU erfasst. Der Sensor wird über den Open-Collector-Ausgang mit einem externen Pull-Up-Widerstand und einem Schutzwiderstand direkt an einen Digitaleingang des LCB angeschlossen. Bei jeder Umdrehung der Waschtrommel liefert der Hall-Sensor einen digitalen Impuls. Zur Bestimmung der Drehzahl wird die Zeitdauer einer Umdrehung gemessen. Hierzu wird ein Timer des  $\mu$ C benötigt, der den zeitlichen Abstand zweier Impulse am Ausgang des Hall-Sensors misst. Zur Reduzierung der zu speichernden Datenmenge werden die gemessenen Drehzahlen mit einem in der Anpassungssystemsoftware frei wählbaren oberen Grenzwert verglichen und die Häufigkeit seiner Überschreitung gezählt. Die Gesamtzahl der Trommelumdrehungen wird durch Integration der Werte des Timers der Drehzahlmessung errechnet. Die Betriebsstundenanzahl ist eine Kenngröße, die in vielen Fällen Abschätzungen über die zu erwartende Restlaufzeit zulässt. Beispielfhaft wird hier die Gesamtbetriebsdauer von Waschmaschine und Heizstab erfasst. Durch Messung der Zeit, in der der jeweilige Betriebsstrom fließt, wird die Betriebszeit der beiden Aggregate bestimmt. Auf Grund der für den Heizstab erforderlichen hohen Betriebsstromstärke von 8,7A wird die Messschaltung parallel geschaltet. Beide Betriebszeiten werden mit je einem Timer des Mikrocontrollers erfasst.

## **5.5 Verbindungselemente mit integrierten Aktoren**

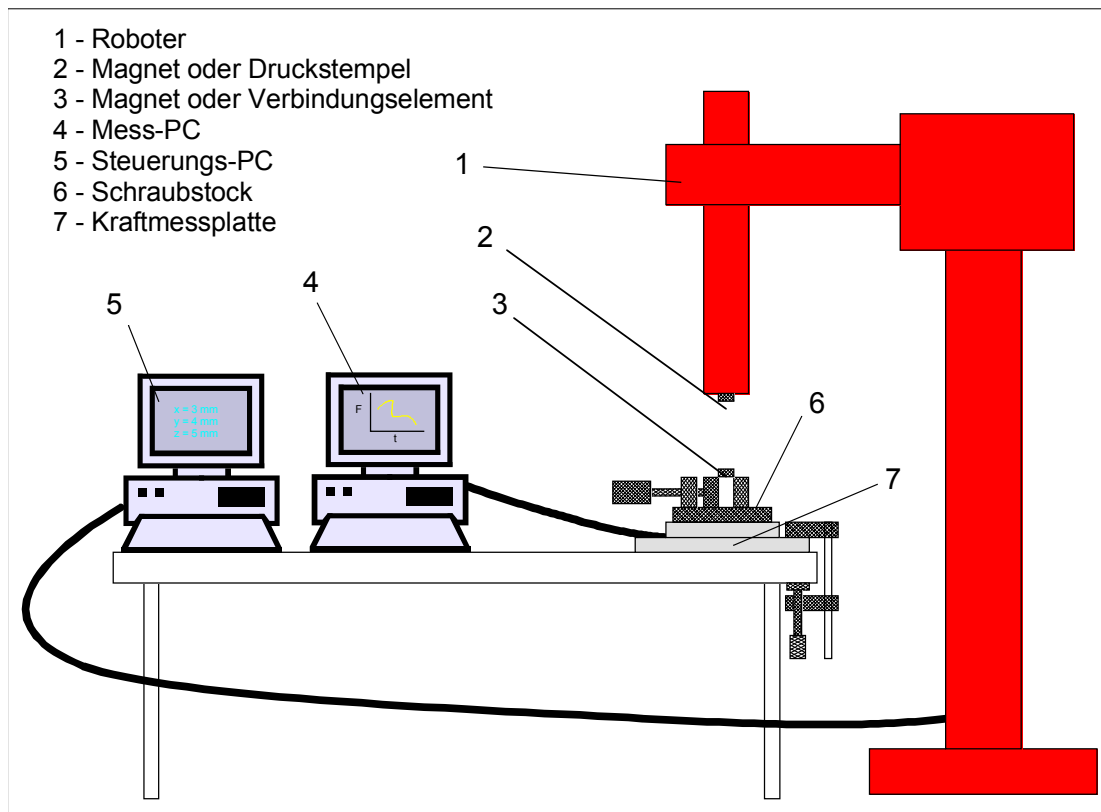
Das Untersystem Aktorik erfüllt im LCU-Konzept die zwei Funktionen ‚Agieren entgegen physischen Veränderungen‘ und ‚Automatisierung der Demontage durch Verbindungselemente mit integrierten Aktoren‘. Im Rahmen dieser Arbeit wurden für die zweite Funktion prototypisch zwei Verbindungselemente entwickelt und realisiert, die nach dem magnetostatischen Wirkprinzip arbeiten. Das magnetostatische Wirkprinzip bietet sich besonders gut an, da es berührungslos über ein Magnetfeld und ohne Versorgungsleitungen für Energie oder Stoffe arbeitet. Durch die Feldwirkung des Wirkprinzips ist es möglich, auch durch Gehäuse verdeckte Verbindungselemente zu lösen und zu schließen. Nur magnetische Energie kann zu vergleichsweise niedrigen Kosten in Form von Magneten an eine Wirkstelle gebracht werden. Im Gegensatz zur

magnetischen muss elektrische Energie über Leitungen, thermische über ein Temperaturfeld, chemische Energie über ein Medium, mechanische berührend und Strahlungsenergie mit Hilfe einer Strahlungsquelle zugeführt werden. Nachteil eines berührenden Schließens und Lösens von Verbindungselementen ist, dass es nicht immer zerstörungsfrei ablaufen kann und bei verdeckten Verbindungselementen Gehäuseteile verformt werden müssen. Da die Steuerung des Verbindungselementes über magnetostatische Kräfte erfolgen soll, ist eine lineare anstatt rotatorische Kinetik des Verbindungselementes ideal. Diese ist z.B. im Fall von Druck-Druck-Verschlüssen gegeben. In Bild 59 ist das Funktionsprinzip der beiden entwickelten, nach dem magnetostatischen Wirkprinzip arbeitenden, aktorischen Verbindungselemente dargestellt.



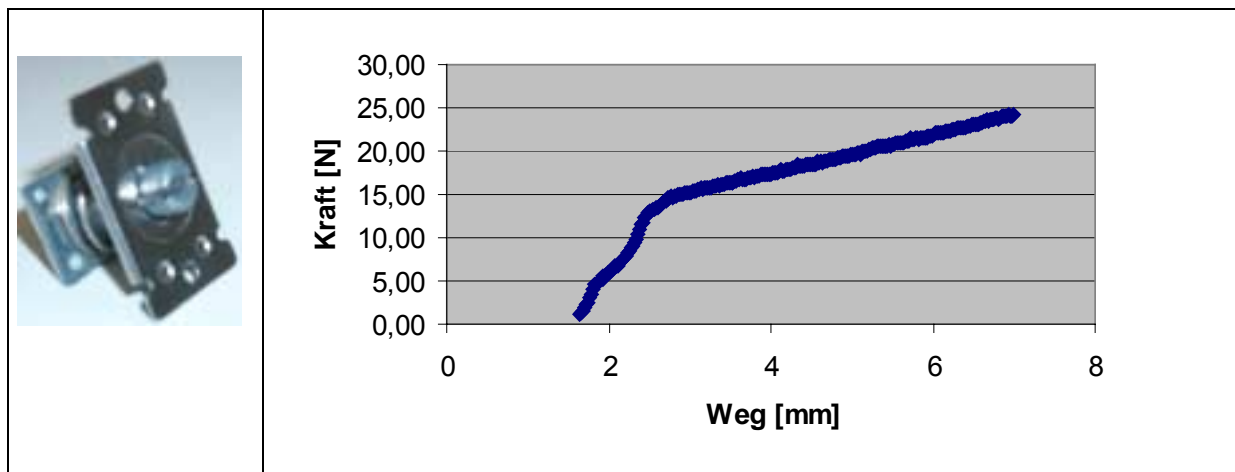
**Bild 59:** Funktionsprinzip eines nach dem magnetostatischen Wirkprinzip arbeitenden aktorischen Verbindungselementes

Durch Messung der Lösekraft der Verbindungselemente und der magnetostatischen Kraft von Magneten konnten Kombinationen aus Verbindungselement und Magnetpaar gebildet werden, welche in ihrem Zusammenspiel das Verbindungselement lösen und schließen können. Die Versuchsreihen wurden mit dem in Bild 60 dargestellten Versuchsaufbau durchgeführt.



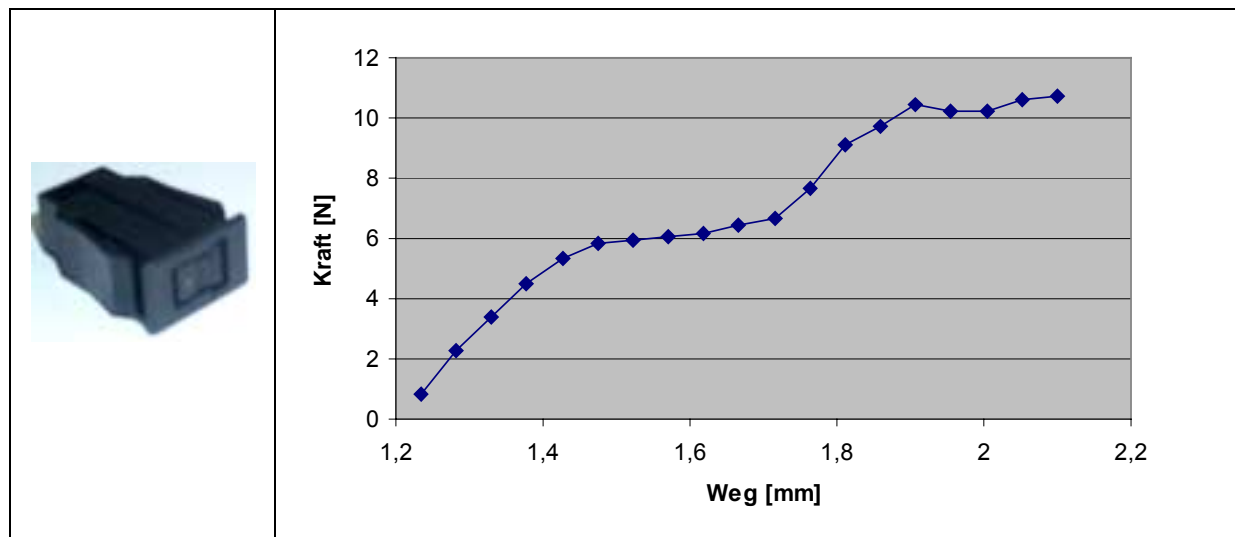
**Bild 60:** Versuchsaufbau zur Messung der Lösekraft der Verbindungselemente und der magnetostatischen Kraft der Magneten

In den nächsten zwei Bildern sind die beiden ausgewählten Druck-Druck-Verschlüsse mit den gemessenen Lösekraftverläufen dargestellt. Tabelle 32 fasst die magnetostatischen Kräfte der sechs Magneten<sup>14</sup> in den beiden Arbeitsabständen 0,5 mm und 4 mm zusammen.



**Bild 61:** Lösekraftverlauf des Druck-Druck-Verschlusses Dzus Pinlatch

<sup>14</sup> Magnete von Fa. IBS Magnet, 12105 Berlin, Kurfürstenstrasse 92.

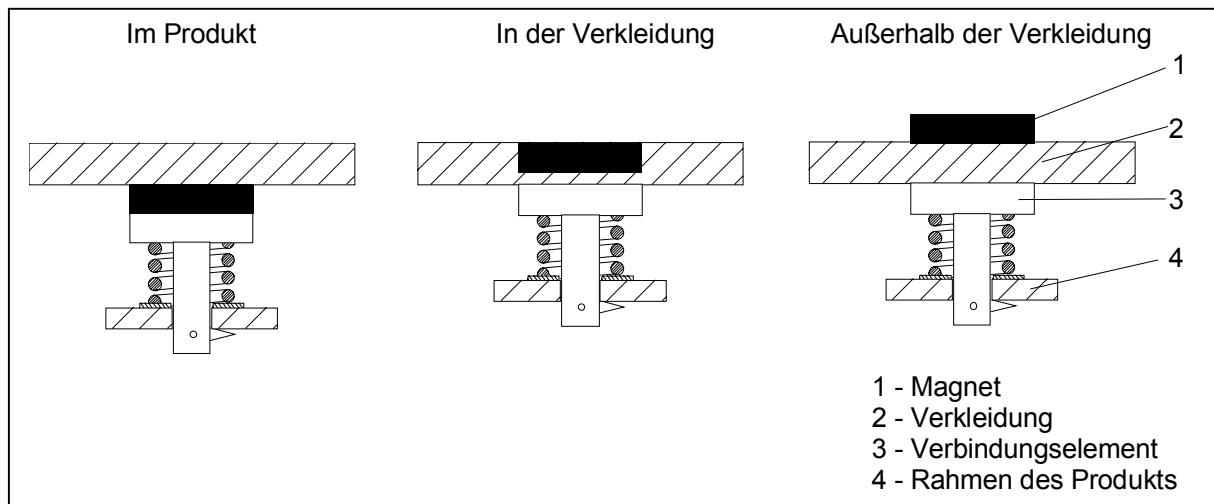


**Bild 62:** Lösekraftverlauf des Druck-Druck-Verschlusses E4 der Fa. Southco

fester Magnet	Magnet im Greifer [N] Kraft in 0,5 mm Abstand/Kraft in 4 mm Abstand					
	NE 1515	NE 3010	NE 2621	RL 30	R 4020	R 6020
NE 1515	20,87/9,39	12,14/7,01	14,88/9,5	1,32/1,32	1,67/1,18	2,26/1,53
NE 3010		39,67/16,48	19,49/12,9	2,72/1,99	3,14/2,16	4,88/3,66
NE 2621			47,1/21,71	6,37/4,42	6,39/4,68	5,72/4,26
RL 30				5,80/5,55	2,35/1,86	2,66/2,17
R 4020					10,61/5,24	6,42/4,31
R 6020						19,20/17,83

**Tabelle 32:** Gemessene magnetostatische Kraft der Magnetenpaare

Für die Realisierung eines aktorischen magnetostatischen Verbindungselementes sind die im nächsten Bild dargestellten drei Varianten der Anordnung von Magnet und Verbindungselement geeignet.

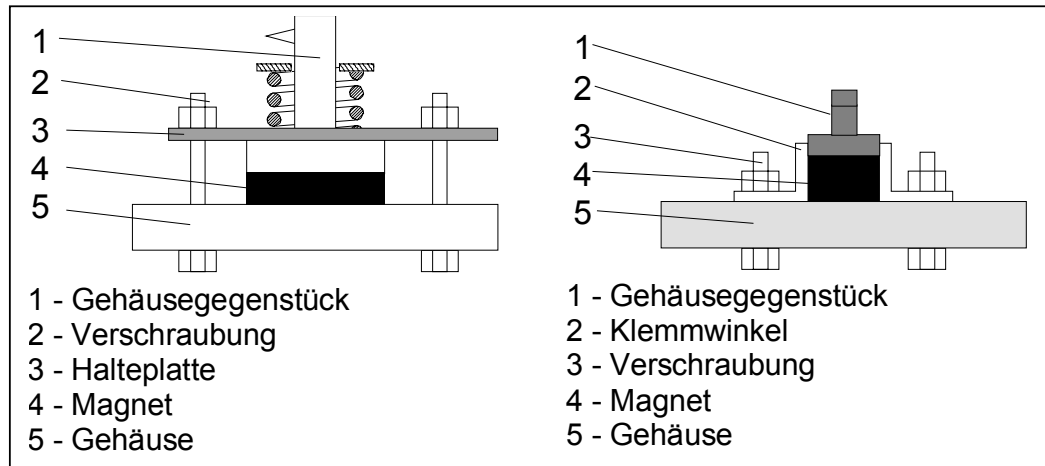


**Bild 63:**      Mögliche Anordnungen von Magnet und Verbindungselement

Die Lage des Magneten im Verbindungselement ist entscheidend für die benötigte Reichweite der Kraft des Magnetenpaares zum Lösen des Verbindungselementes. Vor diesem Hintergrund ist eine Anordnung am Gehäuse ausserhalb der Verkleidung die beste Variante. Allerdings ist diese aus Gründen des Designs nicht zu bevorzugen. Von den verbleibenden Varianten ist unter dem Blickwinkel einer möglichst geringen Magnetfeldreichweite bedingt durch ästhetisch zu bevorzugende kleine Magneten die Anordnung „Magnet in der Verkleidung“ auszuwählen. Vorteil dieser Variante wäre der Raumgewinn gegenüber den anderen beiden Anordnungen. Für die Massenfertigung ist diese Variante vorstellbar. Bei der Entwicklung eines Prototyps würde sie jedoch zu viel Aufwand bedeuten. Der Magnet wurde daher im Produkt angeordnet, d.h. der Magnet befindet sich auf dem Kopf des Verbindungselementes (Bild 63 links). Mit dieser Festlegung gewinnt die Auswahl des Materials und der Wanddicke des Gehäuses an Bedeutung. Magnetische Werkstoffe sind nicht geeignet, weil der Kraftfluss auf den Magnetpol bei der Demontage unterbrochen werden würde. Für die prototypische Realisierung wurden die Werkstoffe Hartfaser, Aluminium und Plexiglas mit einer Dicke der Verkleidung von 2 mm verwendet. Legt man den Luftspalt zwischen Gehäuse und Magnet im Greifer z.B. auf 2 mm fest, so muss die magnetostatische Kraft der Magnetenpaare die Lösekraft der beiden Druck-Druck-Verschlüsse in einem Abstand von 4 mm übersteigen.

Für das Lösen des Verschlusses der Fa. Dzus im Abstand von 4 mm gibt es kein geeignetes Magnetenpaar, das die Lösekraft deutlich übersteigt. Wird der Luftspalt im Ausrastpunkt jedoch um einen Millimeter reduziert, so kann der Verschluss durch das Magnetenpaar NE2621 vs. NE2621 mit einer Kraft von 26,35 N sicher gelöst werden. Zur Lösung des Verschlusses der Fa. Southco in 2 mm Abstand kommen neben diesem Magnetenpaar noch die Kombinationen NE3010 vs. NE3010 und NE2621 vs. NE3010 in Frage. Das Magnetenpaar NE2621 vs. NE3010 liegt mit der Kraft von 12,9 N allerdings nicht sehr weit über der Lösekraft. Berücksichtigt man

noch die Schwächung des Magnetfeldes durch die Verkleidung, muss dieses Magnetenpaar ausgeschlossen werden. Für den Southco-Verschluss wird deshalb das Magnetenpaar NE3010 vs. NE3010 ausgewählt. In Bild 64 sind die beiden realisierten aktorischen Verbindungselemente mit ihrer Befestigung im Produkt dargestellt.



**Bild 64:** Befestigung der Verbindungselemente im Produkt (links: Dzus; rechts: Southco)

Die Prototypen der aktorischen magnetostatischen Verbindungselemente wurden in ein Kastenmodell (Bild 65) aus Bosch-Profilen implementiert.



Kastenmodell mit sichtbaren Gehäuseseiten aus Aluminium und Plexiglas



Zwei im Produkt integrierte aktorische magnetostatische Verbindungselemente (hier: Dzus-Verschlüsse) werden durch zwei am Greiferarm des Roboters befestigte Magneten gelöst und geschlossen

**Bild 65:** Kastenmodell mit integrierten aktorischen Verbindungselementen und magnetostatischem Greiferarm

Das Kastenmodell wurde mit Verkleidungen aus den drei Werkstoffen Plexiglas, Aluminium und Hartfaser getestet. Die Position der aktorischen Verbindungselemente kann entweder mit Hilfe von Markierungen oder eines Demontageplans, der produktbegleitend im LCB oder durch Markierungen abgelegt ist, bereitgestellt werden.



## 5.6 Internet-Kaffeemaschine

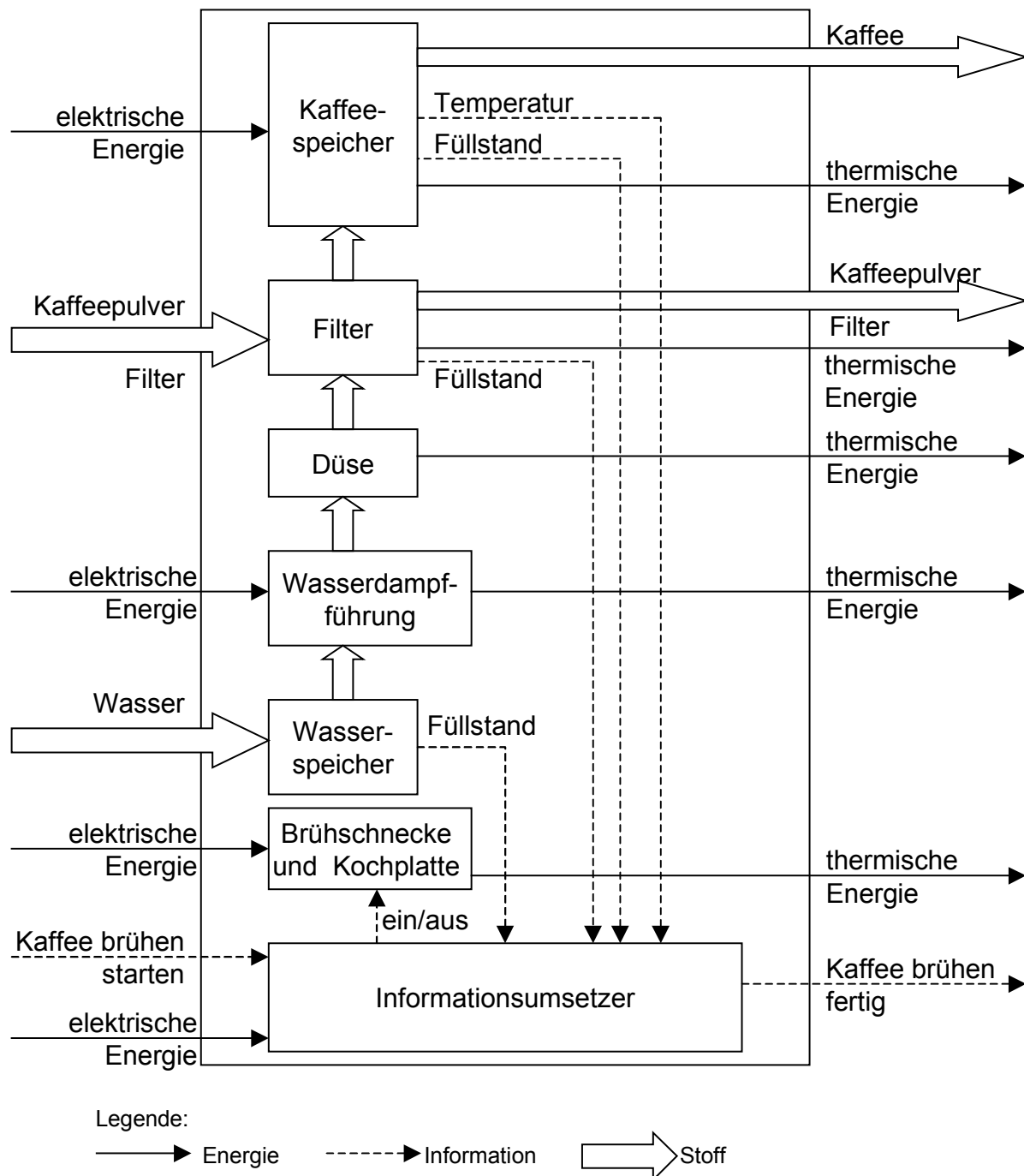
In der Zukunft werden zunehmend neue aber auch bereits bekannte Produkte mit sog. eingebetteten Systemen (Embedded Systems) ausgestattet sein, so dass sie von vornherein die Möglichkeit zu Zusatzfunktionalitäten wie z.B. Internetanbindung, Funkübertragung von Daten oder Ferndiagnose und -wartung integriert haben werden. Ein Beispiel verdeutlicht die Unterschiede zwischen einem Produkt mit und ohne „Embedded System“:

Ein mechanischer Wecker zeigt alltagstauglich genau die Zeit an und bietet eine Alarmfunktion. Bei einer Funkuhr muss die Zeit nicht mehr manuell nach- und bei Zeitwendewechsel eingestellt werden. Trotz der gleichen Funktionalität – Zeitanzeige und Alarm – konnte sich die Funkuhr eine beachtliche Marktnische erobern.

Das eingebettete System stellt im Konzept der LCU das LCB dar. Als Beispiel für ein bekanntes um ein Embedded System erweitertes Produkt wurde die Kaffeemaschine ausgewählt. An diesem preisgünstigen Produkt sollte gezeigt werden, dass es sinnvoll ist, die Grundfunktion - hier: Kaffee brühen - durch zusätzliche Funktionen zu erweitern und so ein in seinem Nutz- und Marktwert verbessertes Produkt zu erhalten. Das Ziel der Entwicklung war eine über das Internet regelbare Kaffeemaschine, die zusätzlich zu den bekannten Funktionen einer Kaffeemaschine auch die folgenden Internetfunktionen bietet:

1. Kaffeebestellung über das Internet,
2. Einstellung der Hardware- und Software-Parameter mit Passwortschutz,
3. E-Mail-Funktion für Nachrichten,
4. statistische Auswertungen und Hinweise,
5. Online-Hilfe, Dokumentation und Servicemeldungen,
6. Links zum Thema Kaffee und
7. Statusanzeige der Kaffeemaschine.

Hierzu wurde für die Kaffeemaschine zuerst ein Systemmodell entwickelt (Kapitel 4.7), das in Bild 66 dargestellt ist. Auf Basis dieses Modells wurden die Sensoren und Aktoren in Anzahl, Art und Kriterien wie z.B. benötigte Genauigkeit bestimmt.



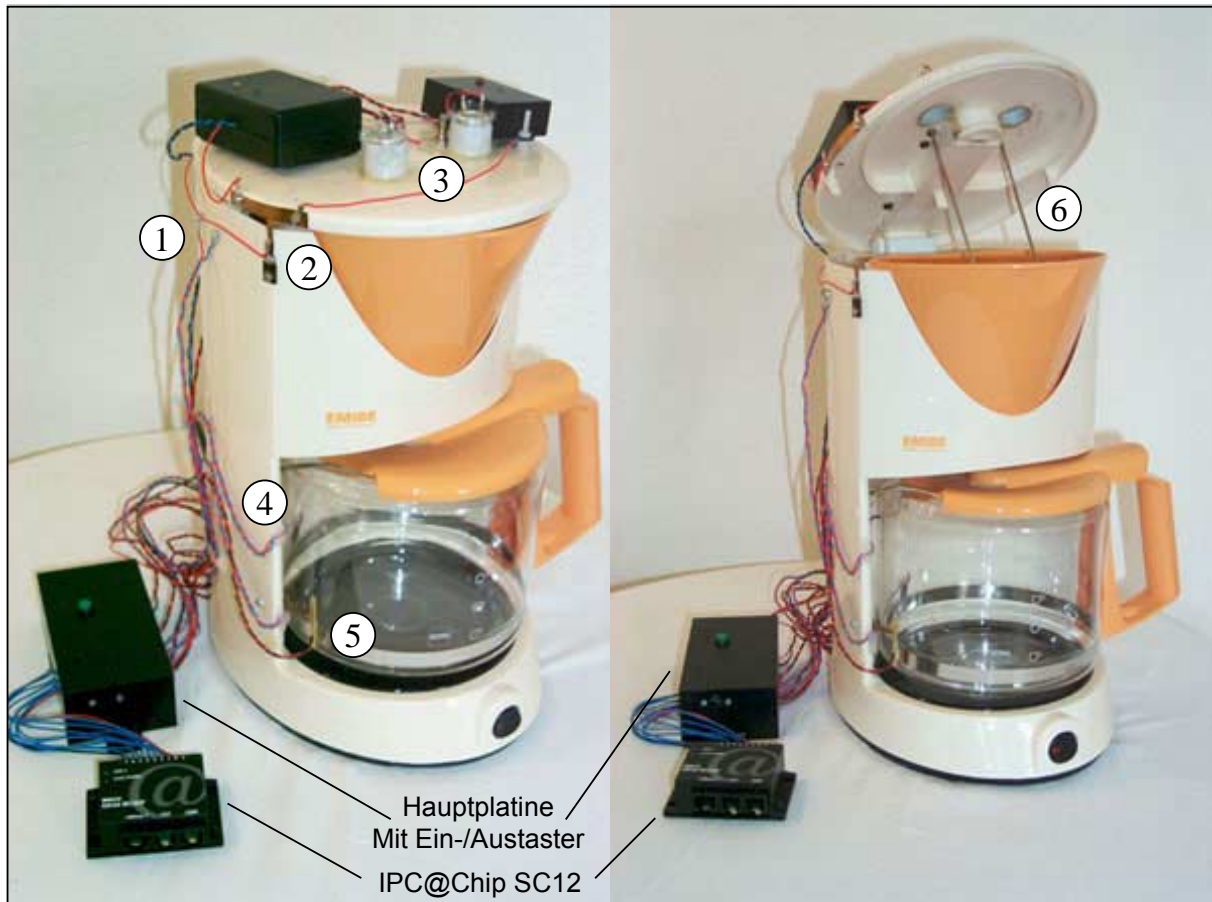
**Bild 66:** Systemmodell der Kaffeemaschine

In eine handelsübliche Kaffeemaschine wurde die LCU bestehend aus einem Mikrocontroller IPC-Chip SC12 der Fa. Beck GmbH als LCB, einem Aktor zum Ein- und Ausschalten der Maschine über das Internet sowie einem Untersystem Sensorik, das die in Tabelle 33 dargestellten Messgrößen erfasst, integriert. In Bild 67 ist die Kaffeemaschine dargestellt. Die Sensoren sind analog Tabelle 33 nummeriert und werden detaillierter in den nachfolgenden drei Bildern Bild 68 bis Bild 70 abgebildet.

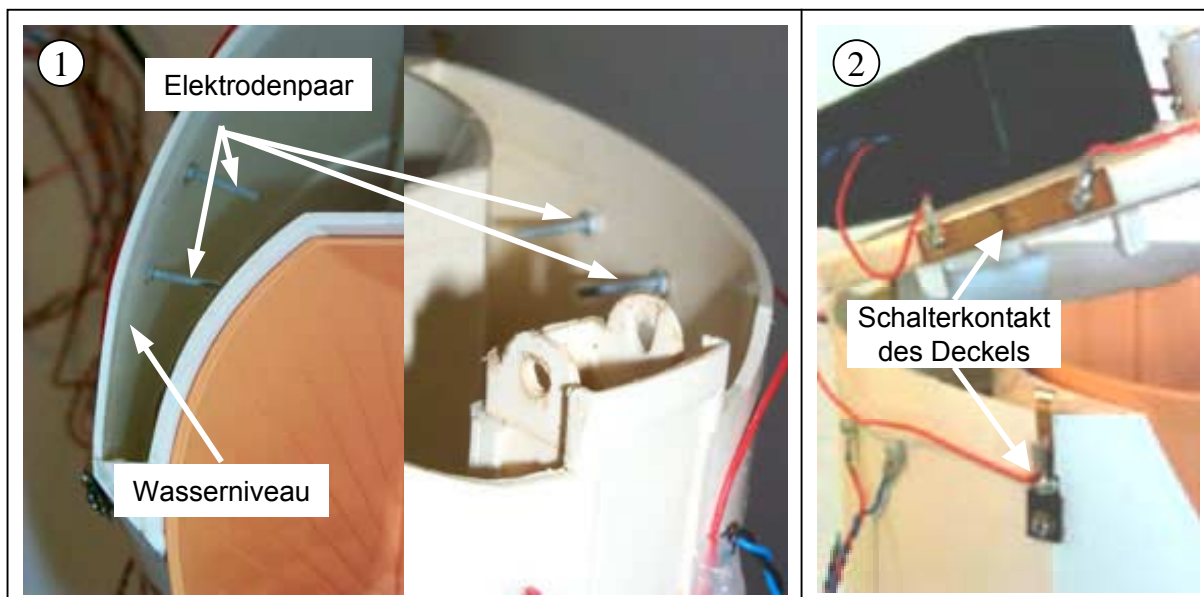
Nr.	Messgröße	Sensor
1	Füllstand Wassertank	1 Elektrodenpaar im Wassertank
2	Filterbehälter geschlossen	Mikroschalter am Deckel
3	Füllstand Kaffeefilter	2 Ultraschallsensoren im Deckel
4	Füllstand Kaffeekanne	2 Fotowiderstände an der Kaffeekanne
5	Temperatur Kaffee	1 Temperatursensor (PT100) an der Kaffeekanne
6	Kaffeepulverqualität	1 Elektrodenpaar (Messung der Kaffeefeuchte)

**Tabelle 33:**      Untersystem Sensorik der Kaffeemaschine

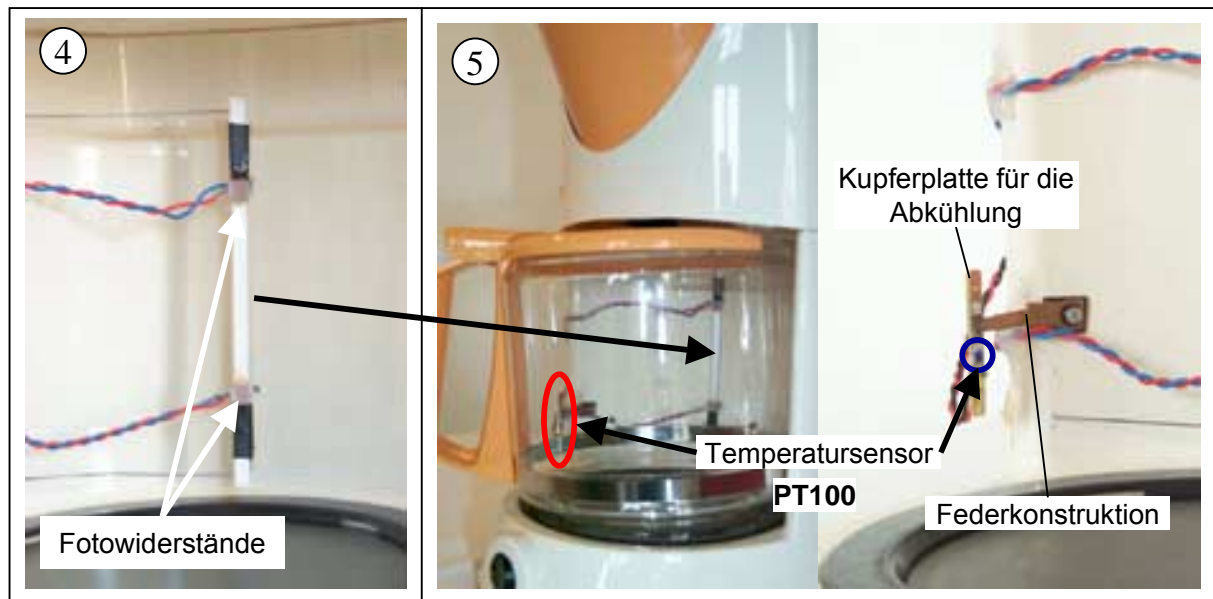
Da das aus technischen und Kostengründen verwendete LCB nur acht binäre Ein- und Ausgänge bietet, mussten alle Messgrößen digital erfasst werden. Deshalb wird der Füllzustand des Wassertanks nur auf die Zustände „leer“ und „voll gefüllt“ überprüft. Zwischenfüllstände werden nicht erfasst. Der Füllstand des Kaffeefilters wird mit zwei Ultraschallsensoren erfasst, deren ausgesendete Ultraschallwellen abhängig vom Füllstand des Kaffees im Filter unterschiedlich stark reflektiert werden. Ein leerer Filter hat den größten Reflexionsgrad. Das Kaffeepulver absorbiert die Wellen und dämpft ihre Reflexion. Jedoch kann mit den Ultraschallsensoren nicht unterschieden werden, ob der Kaffee im Filter frisch, d.h. trocken oder bereits verbraucht, d.h. nass ist. Hierzu werden zwei Elektroden in das Kaffeepulver eingetaucht, die dessen Feuchtigkeit binär erfassen. Der Füllstand der Kaffeekanne wird mit zwei Fotowiderständen an der Kaffeekanne bestimmt, so dass sie keine mechanischen, induktiven oder kapazitiven Sensoren (Schwimmer) enthält und problemlos entnommen werden kann. Es werden nur die zwei Füllstände „mehr als 2 Tassen“ und „voll“ erfasst. Die Temperatur der Kaffeekanne wird mit einem PT100 erfasst, der am Gehäuse befestigt ist und durch eine Federkonstruktion an die Kaffeekanne gepresst wird.



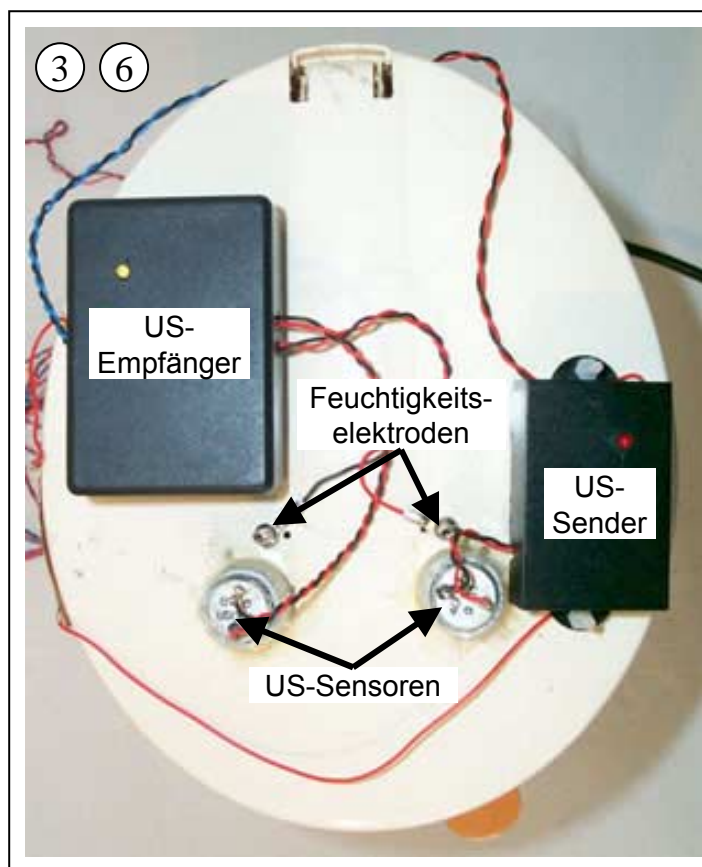
**Bild 67:** Internet-Kaffeemaschine



**Bild 68:** Detailbilder der Sensorik (Fortsetzung in Bild 69)



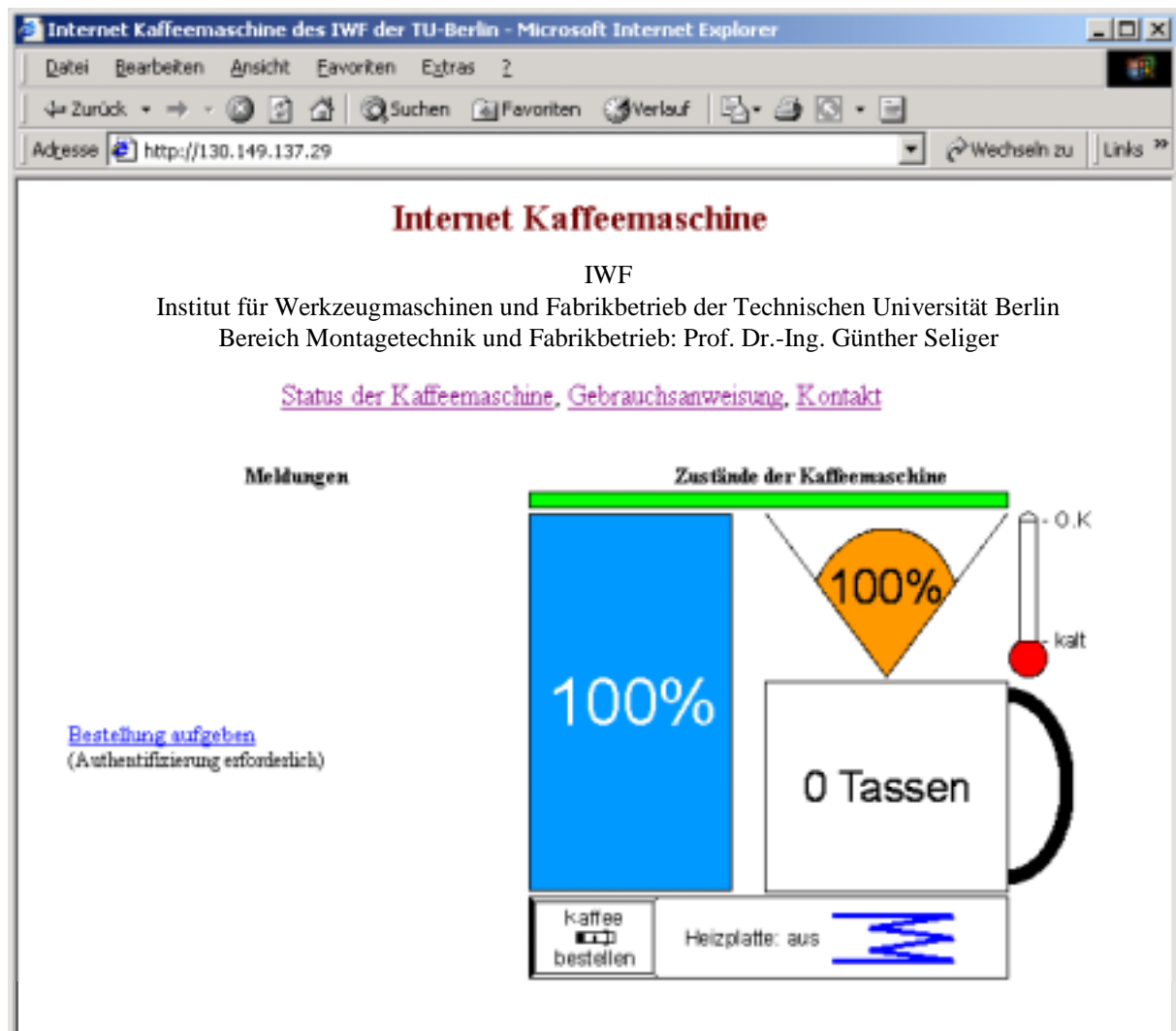
**Bild 69:** Detailbilder der Sensorik (Fortsetzung von Bild 68)



**Bild 70:** Detailbild der Ultraschall- und Feuchtigkeitssensorik

Auf Basis dieser Informationen können Nutzerprofile und Instandhaltungspläne generiert werden. Die E-Mail-Funktion ermöglicht es, an die Nutzer Statusmeldungen z.B. bezüglich Fortgang des Brühvorgangs oder Instandhaltung zu schicken. Die Kaffeemaschine kann sowohl konventionell vor Ort oder über das Internet geregelt werden.

In Bild 71 ist die Homepage der Internet-Kaffeemaschine im Zustand „Beginn Kaffee brühen“ dargestellt.



**Bild 71:** Homepage der Internet-Kaffeemaschine mit der Zustandsanzeige zu Beginn des Brühvorgangs

Die 4. Internetfunktion „statistische Auswertungen und Hinweise“ stellt Informationen über

- Wasserverbrauch,
- Energieverbrauch,
- Kaffeeverbrauch,
- durchschnittliche Temperatur und
- durchschnittliche Durchlaufdauer bereit.

Aufgrund der auf acht begrenzten Anzahl der Messeingänge konnten die Messgrößen nicht so genau erfasst werden, wie es eine optimierte Fernregelung erfordert. Wird in Zukunft eine LCU speziell für diesen Anwendungsfall entwickelt, kann es genau auf die Mess- und Regelanforderungen der Kaffeemaschine angepasst werden.

So können dann die Füllstände „tassengenau“ erfasst werden. Eine Messung des pH-Werts des Kaffees erlaubt eine verbesserte Regelung der Warmhaltetemperatur und -zeit, wodurch die Qualität des gebrühten Kaffees gesteigert wird.

Nichtsdestotrotz stellt diese mit einer LCU ausgestattete Kaffeemaschine ein gutes Beispiel eines preisgünstigen Produktes dar, das durch ein eingebettetes System in seinem Prozessablauf optimiert und mit der Beobachtung und Regelung über einen Internet-Browser um Internetfunktionalität erweitert werden konnte.

## 5.7 Internet-Automobil

Mit einer LCU für Automobile wurde ein weiteres Beispiel für ein Produkt mit einem integrierten Embedded System entwickelt, um Produktlebenslaufsdaten des Automobils über das Internet bereitstellen zu können. Bis auf die Sensoren ist die Hardware der LCU in Bild 72 abgebildet.

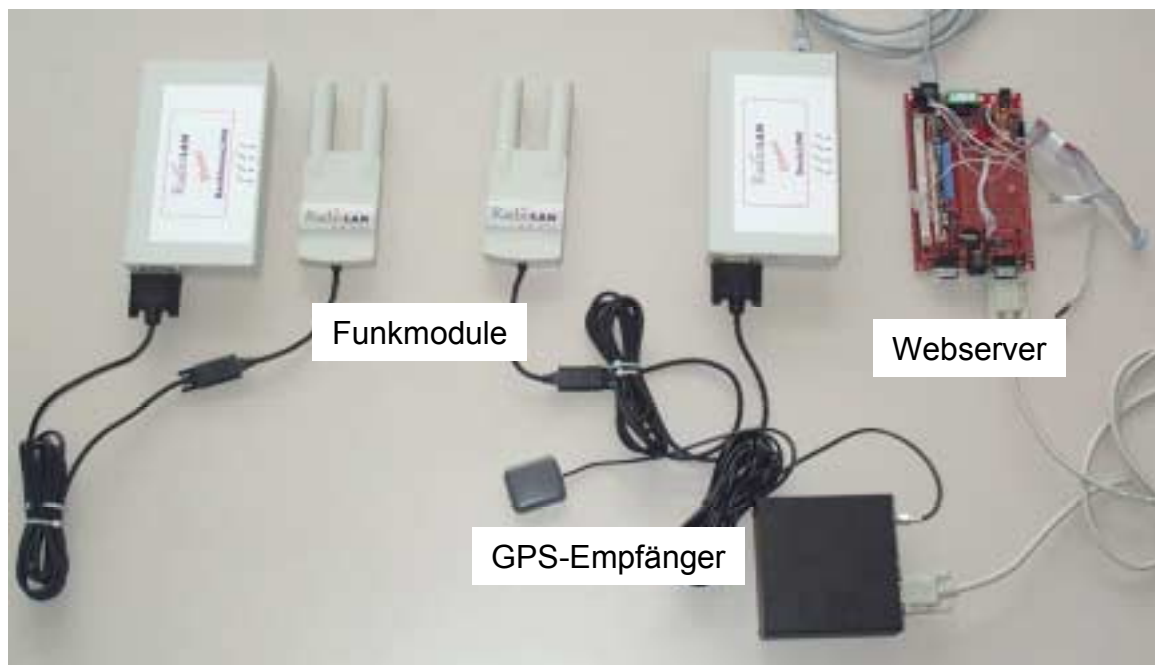


Bild 72: Hardware der LCU für Automobile

Diese LCU besteht aus den Untersystemen Sensorik und LCB. Das LCB wird durch einen Webserver des Typs TINI der Fa. Dallas Semiconductor gebildet. Das Interface des LCB muss die Daten über Funk ins Internet zu einem Server übertragen können. Hierzu wurden als Sende- und Empfangsantenne zwei Funkmodule der Fa. RadioLAN verwendet. Das Untersystem Sensorik besteht aus drei Temperatursensoren, einem Drehzahlsensor und einem GPS-Empfänger zur Bestimmung der Position des Automobils. Diese LCU wurde in einen Smart integriert. Die Lebenslaufdaten der Sensoren und des GPS-Empfängers werden vom Webserver im Internet bereitgestellt.



## 5.8 Verbindungselemente mit integrierten Sensoren

Ziel war es, durch Integration von Sensoren sicherheitsrelevante Verbindungselemente zu überwachen. Die Funktion des Verbindungselementes, Kräfte und Momente zu übertragen und aufzunehmen, kann überwacht sowie zusätzliche Informationen über Umgebungsbedingungen können gewonnen werden. Hierzu muss das Belastungskollektiv des Verbindungselementes erfasst werden. Damit können Versagensfälle von Verbindungselementen frühzeitig erkannt und Störfälle vermieden werden. Dazu wurde das am häufigsten eingesetzte Verbindungselement Schraube ausgewählt. Zur Feststellung des Versagens einer Schraubverbindung im Betrieb und zur Aufnahme von Umgebungseinflüssen wurden verschiedene Sensoren prototypisch in Schrauben integriert. Die häufigsten Gründe für das Versagen von Schraubverbindungen sind durch Kriechen verursachtes Lockern, selbsttätiges Losdrehen und Verlieren der Verbindung [BAU-91].

Für alle drei Versagensarten ist ein Abfall der Klemmkraft unter die Vorspannkraft charakteristisch. In den prototypisch realisierten Schrauben wird die Vorspannkraft mit zwei am Schaft montierten Dehnungsmessstreifen (DMS) erfasst. Im Vergleich zu anderen evaluierten Verfahren wie z.B. DMS am Schraubenkopf, Kraftmessring und Drucksensor weist es ein hohes Maß an Mess- und Wiederholgenauigkeit auf. Außerdem schneidet das Verfahren unter Montage- und Kostengesichtspunkten am besten ab. In Bild 73 sind zwei prototypische Schrauben mit je zwei am Schaft applizierten DMS zur Messung der Vorspannkraft abgebildet.



**Bild 73:** DMS appliziert auf Schrauben

Weiterhin wurden zusätzliche Sensoren zur Messung der Produktumgebungsgrößen Temperatur, Helligkeit, UV-Strahlung und Luftfeuchtigkeit prototypisch integriert. In Bild 74 sind einige Prototypen der implementierten Schrauben dargestellt. Die DMS wurden auf die vorher am Schaft abgedrehte Schraube aufgeklebt und die Kupferadern zur Signalübertragung an den Temperatursensor und die DMS gelötet. Der Temperatursensor wird in den Hohlraum an der Spitze der Schraube geklebt, die Kupferadern wurden an die Flanscbuchse gelötet. Die Flanscbuchse ist im Gewinde mit dem Kopf verklebt. Die prototypische Schraube zur Messung der Vorspannkraft und der Umgebungstemperatur wurde mit einem LCB auf Basis des Mikrocontrollers ST 62E25 von SGS Thompson gekoppelt, so dass die erfassten Daten ausgewertet und gespeichert werden können (Bild 74 rechts). Zur Erfassung der von den



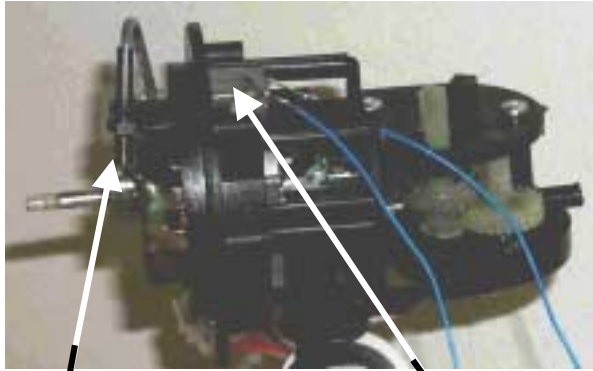
Sensoren erfassten Messwerte wird die sog. Anderson-Stromschleife [AND-97] angewendet. Mit Hilfe der Anderson-Stromschleife ist es möglich, mit zwei Leitungen zwei Sensoren zu verwalten. Weiterhin bietet diese Vorteile gegenüber den üblichen Brückenschaltungen wie z.B. Unempfindlichkeit gegenüber parasitären Kapazitäten oder Temperaturschwankungen der einzelnen Brückenarme.



**Bild 74:** links: prototypische Schrauben mit integrierten Sensoren zur Überwachung der Vorspannkraft über DMS und je einer Umweltgröße (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, UV-Strahlung und Helligkeit) rechts: Schraube mit integrierten Sensoren für Vorspannkraft und Temperatur mit LCB und LED-Anzeige sowie Klemmvorrichtung

## 5.9 Ventilator

Ventilatoren, wie sie in großer Zahl zur Kühlung von Prozessoren und Baugruppen in elektronischen Systemen eingesetzt werden, kündigen zum Totalausfall führende Verschleißerscheinungen durch Drehzahlabfall und Anstieg der Lagertemperatur an. Zur Überwachung des Produktzustandes von Ventilatoren wurde deshalb eine LCU bestehend aus einem Mikrocontroller des Typs ST 62E25 von SGS Thompson und zwei Sensoren zur Messung von Lagertemperatur und Drehzahl entwickelt. Die LCU meldet ein Unter- bzw. Überschreiten von flexibel per Software einstellbaren Grenzwerten beider Messgrößen und speichert Grenzwertverletzungen mit Zeitstempel. Die Lagertemperatur wird mit einem Metallwiderstandsthermometer PT1000 in Brückenordnung, die Drehzahl mit einem induktiven Sensor mit Frequenz-Spannungsumwandlung erfasst. In Bild 75 ist die LCU für Ventilatoren dargestellt.



induktiver Drehzahlsensor  
resistiver Temperatursensor (PT 1000)

Ventilator mit LCU

Bild 75: LCU für Ventilator

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Durch Anpassung kann der Abnutzung von Produkten entgegengewirkt und damit eine Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen erreicht werden. Anpassung erfordert die Bereitstellung von Anpassungsinformationen, auf deren Basis über Art, Ausmaß und Zeitpunkt der Anpassung entschieden werden kann.

In der Produktentwicklung können für einige Bauelemente Zuverlässigkeitsanalysen mit Hilfe von Lebensdauer- und Symptommodellen durchgeführt werden. Für Bauelemente, für die kein Lebensdauermodell existiert, können Schadensstatistiken herangezogen werden. In der Nutzungsphase können Aussagen über das Verhalten von Produkten mit Hilfe von Lebensdauer- und Symptommodellen sowie durch die Methoden der Serienerprobung, Marktforschung sowie Felddatenerfassung und -verarbeitung gewonnen werden. Die mit den Methoden der Zuverlässigkeitsanalysen ermittelten Ausfallzeiten streuen zum Teil erheblich. Trotz identischer Randbedingungen und Belastungen ergeben sich recht unterschiedliche Ausfallzeiten, so dass einem Bauteil keine bestimmte ertragbare Lastwechselzahl zugeordnet werden kann. Gleiche Bauteile können bei gleichen Beanspruchungskollektiven unterschiedliche Lebensdauern haben. Durch Serienerprobung, Marktforschung und Auswertung von Felddausfällen werden nur wenige in der Praxis auftretende Belastungen und Nutzungsmodalitäten abgedeckt. Die passive Art der Produktdatenbereitstellung kann nur dann erfolgreich umgesetzt werden, wenn bereits aus der Herstellungsphase alle für die Anpassung benötigten Informationen zur Verfügung stehen. Die aktive Form der Produktdatenbereitstellung wird bisher nur im Rahmen von wenigen Entwicklungen für einzelne Anwendungsfälle durchgeführt.

Als Architektur eines Systems zur Erleichterung der Anpassung stellt die Life Cycle Unit einen gangbaren Weg dar. Basis der Systementwicklung war die Funktionsstruktur, der sich die Identifikation der Anpassungsinformationen anschloss. Nach der Beschreibung der Kopplung der Anpassungsinformationen mit Zuverlässigkeitsmodellen zwecks verbesserter Abnutzungsvorhersage wurde die Systemstruktur der LCU entwickelt. Es folgte die Betrachtung der Kombinierbarkeit der Elemente und Untersysteme sowie der Teilsysteme Energie-, Informations- und Stofffluss der LCU. Da ein am Markt erfolgreiches Produkt nicht nur technisch umsetzbar, sondern auch ökonomisch tragfähig sein muss, folgte die Entwicklung einer allgemeinen Methode der Kalkulation einer im Rahmen der erlaubten Kombinationen beliebig ausgelegten LCU für ein Produkt in seinem Anwendungsfeld. Die Methode wurde am Beispielprodukt Waschmaschine demonstriert. Zur Konkretisierung der Auslegung einer LCU für ein Produkt in seinem Anwendungsfeld wurde eine Methode entwickelt und an einem

Beispielprodukt evaluiert. Eine Betrachtung potentieller Geschäftsfelder schloss die Systementwicklung ab.

Durch erste Pilotrealisierungen auf Untersystem-, Produkt- und Anpassungssystem-Ebene konnte die technische und ökonomische Machbarkeit des Konzepts der LCU gezeigt werden. Hierzu wurden Softwareprogramme entwickelt sowie Hardwarekomponenten konstruiert und realisiert. Die Integration von Sensoren und Aktoren in Verbindungselementen erwies sich als umsetzbare Option der Überwachung sicherheitsrelevanter Verbindungen bzw. der automatisierten Demontage. Die Entwicklung des Farb- und Formerkennungssystems ermöglichte zusammen mit dem realisierten Lese- und Schreibsystem den Einsatz von Lackfarbenmarkierungen und Barcodes als produktbegleitendes Speichermedium für Anpassungsdaten insbesondere bei preiswerten Produkten.

Einige unterschiedlich ausgelegte LCUs integriert in verschiedenen Produkten gestatteten bereits einen Blick auf die zukünftigen Märkte von eingebetteten Systemen in bekannten aber auch neuen, heute noch unbekannten Produkt- und Nutzenangeboten. Wo heute noch jedes Produkt einzeln seinen Dienst verrichtet, werden zu Netzwerken verbundene zur Kommunikation untereinander als auch mit der Außenwelt befähigte Produktcluster mannigfaltige Dienste und Nutzenangebote bereit halten. Einen kleinen Einblick in diese neue Produktwelt gaben die realisierten zur Bereitstellung von Anpassungsinformationen über das Internet fähigen Produkte Kaffeemaschine und Automobil. Insbesondere die Kaffeemaschine offenbarte die Chance, Grundfunktionen eines Produktes – hier das Brühen von Kaffee – durch verbesserte Datenbereitstellung und -anwendung qualitativ auf ein höheres Niveau zu heben.

Zukünftige Forschungsbedarfe können vor allem im Bereich der Sensorik und Aktorik identifiziert werden. Die Entwicklung von mit mikroelektronischen und mikrosystemtechnischen Methoden integrierten Bio- und Chemochips wird in der Zukunft für die LCU auch das Anwendungsfeld der Erfassung von biologisch und chemisch bedingten physischen Veränderungen breiter öffnen als derzeit möglich. Noch stärker gilt diese Einschränkung für die zurzeit zur Verfügung stehenden Aktoren zur Integration in Verbindungselementen. Einen weiteren Forschungsschwerpunkt bildet die Entwicklung neuer und verbesserter Zuverlässigkeitsmodelle von mechanischen und elektrischen Bauteilen. Die Entwicklung intelligenter Verknüpfungsalgorithmen ermöglicht eine eindeutige und preiswerte Erfassung physischer Veränderungen mit Hilfe weniger gemessener Produktzustände. Detailliert untersuchte Anwendungen des Konzepts der LCU an Investitions-, Gebrauchs- und Verbrauchsgütern können die Entwicklung und Besetzung neuer Geschäftsfelder fördern.

## 7 Schrifttum

- ADA-97 Adam, W.;  
Busch, M.;  
Nickolay, B.: Sensoren für die Produktionstechnik. Berlin, Springer Verlag, 1997
- AND-97 Anderson, K.F.: The Current Loop: A Measurement Circuit Topology Alternative to the Wheatstone Bridge, SPIE, Volume 3042, 61-76, 1997.
- AUT-00 N.N. Intelligenter Reifen bald in Serie. In: Automobil Entwicklung, 1/2000.
- BAL-82 Ballard, D.-H.: Computer Vision, Prentice-Hall, 1982.
- BAU-91 Bauer, C.-O.: Handbuch der Verbindungstechnik. Carl Hanser Verlag, München, 1991.
- BEC-95 Becker, P.;  
Gottschalk, A.;  
Ulbricht, H.: Qualität und Zuverlässigkeit elektronischer Bauelemente und Geräte bestimmen, voraussagen und sichern. Expert Verlag, Renningen, 1995.
- BER-00 Bermbach, R.: Embedded Controller – Eine Einführung in Hard- und Software, Hanser Verlag, München, 2000.
- BER-89 Bertsche, B.: Zur Berechnung der System-Zuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten. Dissertation Universität Stuttgart IMG. Stuttgart, 1989.
- BER-99 Bertsche, B.;  
Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Maschinenbau. 2. Auflage, Springer Verlag, 1999.
- BOO-01 Boos, F.: Steht das Wälzlager vor dem Aus? in: Instandhaltung, Februar 2001, S. 31-32.
- BET-99 N.N. Filterwechsel – aber wann? In: Der Betriebsleiter, 4/99, S. 18-21.
- BRE-00 Brealey, R.A.;  
Myers, S.C.: Principles of Corporate Finance. McGraw-Hill, Inc., 2000.
- BUX-86 Buxbaum, O.: Betriebsfestigkeit. Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1986.
- CHI-97, Chiodo, J.D.;  
Anson, A.W.;  
Billett, E.H.;  
Harrison, D.J.;  
Perkins, M.: Eco-Design for Active Disassembly Using Smart Materials. In: Proceedings of the second International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies. 2-6 März 1997, Pacific Grove, Kalifornien, USA, pp. 269-274.

- |           |   |   |
|-----------|---|---|
| CHI-99    | Chiodo, J.D.;<br>Billett, E.H. ;<br>Harrison, D.J.: | Preliminary Investigations of Active Disassembly Using Shape Memory Polymers. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment ISEE 1999, 1-4 Februar 1999, Tokyo, Japan, pp. 590-596.                        |
| CHI-99a   | Chiodo, J.D.;<br>Boks, C.:                          | A Feasibility Study on Active Disassembly using Smart Materials – A Comparison with Conventional End-of-Life Strategies. In: Proceedings of the 6th International Seminar on Life Cycle Engineering, June 21/23, 1999, Kingston, Canada, pp 92-101. |
| DAE-99    | Daenzer, W.F.;<br>Huber, F.:                        | Systems Engineering. Methodik und Praxis. Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 1999.   |
| DÄU-91    | Däumler, K.-D.:                                     | Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung. Verlag Neue Wirtschaftsbriefe, Berlin, 1998.  |
| DAM-98    | Damm, K.:   | Selbsttest integrierter Sensoren in der Betriebsphase mit den Schwerpunkten Signalübertragung und Signalverarbeitung. Shaker Verlag Aachen, 1998.   |
| DIN 31051 | N.N.  | DIN 31051 Instandhaltung: Begriffe und Maßnahmen. Berlin, Beuth-Verlag, 1985.   |
| DIN 50035 | N.N.  | Begriffe aus dem Gebiet der Alterung von Materialien. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1989.  |
| DIN 50320 | N.N.  | Verschleiß - Begriffe - Systemanalyse von Verschleißvorgängen - Gliederung des Verschleißgebietes. Berlin Beuth-Verlag 1979.  |
| DIN 50900 | N.N.  | DIN 50 900 Teil 1 + 2. Korrosion der Metalle. Begriffe. Berlin Beuth-Verlag 1982.   |
| DIN 8013  | N.N.  | DIN ISO 8013: Elastomere - Bestimmung des Kriechens bei Druck- oder Schubbeanspruchungen. Berlin Beuth-Verlag, 1988.  |
| DIN 8580  | N.N.  | DIN 8580 E Fertigungsverfahren. Begriffe, Einteilung (Entwurf). Berlin: Beuth-Verlag, 1985.   |
| DVZ-99    | N.N.  | Deutsche Verkehrszeitung Nr. 10, 23 Januar 1999, S.3.   |
| ELV-98    | N.N.  | Multi-Systemmonitor LM 78, ELV, 5, S. 55-57, 1998.  |
| FAZ-01    | N.N.  | Yello will wissen, was Stromkunden wünschen. Frankfurter Allgemeine Zeitung, 20.08.2001, S. 18.   |

- FRI-96 Fritsch, M.; Wein, T.; Ewers, H.J.: Marktversagen und Wirtschaftspolitik, Verlag Franz Vahlen, 1996.
- GAB-01 Hadeler, T.; Arentzen, U.: Gabler Wirtschaftslexikon. Gabler-Verlag, Wiesbaden, 2001.
- GEI-94 Geiger, W.: Qualitätslehre, Einführung-Systematik-Terminologie. Vieweg-Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 1994.
- GEP-98 Geppert, L.; Sweet, W.: Analysis and Forecast, IEEE Spectrum, Technology 1998, January 1998.
- GRI-98 Grimm, W.M.; Klausner, M.; Horber, H.; Rech, W.-H.: Product-integrated electronic data log as an enabler for reuse, repair, quality management and market research. In: Proceedings of the Care Innovation '98. 16-19 November, Wien, S. 76-83, 1998.
- GRO-74 Groß, H.R.W.: Beitrag zur Lebensdauerabschätzung von Stirnrädern bei Zahnkraftkollektiven mit geringem Volligkeitsgrad. Dissertation, TH Aachen, 1974.
- GRO-97 Großmann, K.: Intelligente Funktionsmodule der Maschinentechnik. Zwischenbericht 1997 zum Landesinnovationskolleg. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen. Dresden, 1997.
- GRO-99 Grote, U.: Life-Cycle-Cost-Management bei Schienenfahrzeugen. In: Konferenzband der 3. Schienenfahrzeugtagung RAD 99, Dresden, 24. - 26. Februar 1999, S. 103-105.
- GRU-00 Grudzien, W.: Erweiterte Qualitätssicherung in der Nutzungsphase. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF), 05, 2000, München, Carl Hanser Verlag, S. 210-214.
- HAI-92 Haibach, E.: Betriebsfeste Bauteile. Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- HAL-95 Hall, E.A.H.: Biosensoren, Springer Verlag, 1995.
- HAS-00 Hascher, W.: Bluetooth - die Grundlagen. Technische Details zur 2,4-GHz-Funk-Netzwerktechnologie. In: Elektronik, 7/2000, München, S. 56-60.
- HEC-98 Hecht, M.: Fahrwerkkomponenten - neue Anforderungen und Entwicklungshilfsmittel. In: Eisenbahntechnische Rundschau 47 (1998), Heft 11, November 1998, S. 679-684.

- |        |  |   |
|--------|--|---|
| HEI-98 | Heimann, B.;<br>Gerth, W.;<br>Popp, K.:                        | Mechatronik: Eine Einführung in die Komponenten zur Synthese und die Methoden zur Analyse mechatronischer Systeme, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1998. |
| HIR-00 | Hirschbach, O.;<br>König, C.:                                  | Frühzeitig den Vorsprung sichern. Automobil-Produktion (2000) 2, S. 48-50.  |
| HOF-00 | Hofmeister, W.:  | Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse. Kohlhammer Verlag, Berlin, 2000.  |
| HOH-00 | Hohm, K.:  | Flexible robotergestützte Demontage. In: Kolloquium zur Kreislaufwirtschaft und Demontage. Berlin (2000), S. 135-137.   |
| HÜT-91 | N.N.   | Hütte - Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. Berlin, Springer-Verlag, 1991.  |
| JAN-01 | Jansen, D.:  | Handbuch der Electronic Design Automation, Hanser Verlag, München 2001.   |
| JAN-92 | Janocha, H.:   | Aktoren - Grundlagen und Anwendungen, Springer-Verlag, Berlin, 1992.  |
| JEN-95 | Jendritza, D. J.:  | Technischer Einsatz neuer Aktoren. Renningen-Malmsheim, Expert-Verlag, 1995.  |
| JOA-82 | Joachim, F.J.:   | Streuungen der Grübchentragfähigkeit. Antriebstechnik 21 (1982), Nr. 4, S. 156-159.   |
| KLE-98 | Kleger, R.:  | Sensorik für Praktiker. VDE Verlag, 1. Auflage, Berlin, 1998.   |
| KOL-98 | Koller, R.:  | Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Springer-Verlag, Berlin, 1998.   |
| KRA-00 | Krause, W.;<br>Neubert, H.:                                    | Rationelle Demontage. Wie pneumatisch lösbare Verbindungen das Recycling erleichtern. F&M, Carl Hanser Verlag, 108 (2000), S. 48-52, 2000.  |
| KRÜ-90 | Krückeberg, F.;<br>Spaniol, O.:                                | Lexikon der Informatik und Kommunikationstechnik. Düsseldorf, VDI Verlag, 1990.   |
| LEH-97 | Lehmann, T.;<br>Oberschelp, W.;<br>Pelikan, E.;<br>Repges, R.: | Bildverarbeitung für die Medizin, Springer-Verlag, 1997.  |
| LEH-99 | Lehmann, J.:   | Möglichkeiten der zustandsbezogenen Instandhaltung am Beispiel eines modernen Niederflurfahrzeugs. In: Konferenzband der 3. Schienenfahr-   |



- zeugtagung RAD 99, Dresden, 24. - 26. Februar 1999, S. 58-59.
- LEM-02     Lemme, H.:     Gen-Identifikation elektronisch. Biosensoren beschleunigen Nachweis von Krankheitserregern. In: Elektronik, 1/2002, München, S. 38-45.
- LIE-98     Liebig, B.:     Verband Deutscher Motoreninstandsetzer – Ein Verband stellt sich vor. Ratingen: 1998.
- LIN-98     Linn, G.:     Users' Abilities and Problems in Product Disassembly: Cueing Separation. In: Proceedings of the 5th International Seminar on Life Cycle Engineering, Life Cycle Design '98, KTH Stockholm, Sweden, September 16-18 1998, pp. 35-44.
- LÜT-98     Lütge, G.:     Elektronikschrott ist giftig und wertvoll. Statt den Müllberg wachsen zu lassen, müsste das Recycling erzwungen werden. Die Zeit. 1998 Nr. 13.
- MAR-01     N.N.     Die erste Waschmaschine im Internet. In: www.margherita2000.com, Mai 2001.
- MAY-00     Mayer H.W.:     Luft nachfüllen – ja, aber nur noch auf Tipp des On-Board-Prüfsystems. VDI-Nachrichten, Nr. 34, 25.08.00.
- MEN-97     Menz, W.;  
Mohr, J.:     Mikrosystemtechnik für Ingenieure, Weinheim 1997.
- MIN-99     Minami, K.;  
Morishita H.;  
Esashi, M.:     A bellows-shape electrostatic microactuator, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 72, Issue 3, 16 February 1999, Pages 269-276.
- MRO-98     Mrowka, J.;  
Schilbach, P.;  
Naumann, G.:     Der autarke innovative Güterwagen. In: Eisenbahningenieur (49), 4, 1998, S. 81-83.
- MÜL-01     Müller, K.:     Wege zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen. Dissertation TU Berlin. Berlin FhG/IPK Berlin, 2001.
- NAS-98     Nasr, N.;  
Alesso, S.;  
Curwin, A.:     Xerox Develops Environmentally Conscious Office Machine. In: Remanufacturing Today. Rochester, USA: 1998. S.4.
- NEU-00     Neubert, H.:     Pneumatisch lösbare Verbindungen für eine rationelle Demontage, Kolloquium zur Kreislaufwirtschaft und Demontage des Sfb 281, Berlin, 20./21. Januar 2000.

- |         |  |   |
|---------|--|---|
| NEU-95  | Neubert, H.;<br>Gohrbandt, D.;<br>Schulze, L.: | Simultan lösbare Verbindungen. F&M- Feinwerk-<br>technik und Messtechnik 103 (1995) 7-8, S. 453-<br>455.  |
| OCO-84  | O'Connor, P.D.T.:                              | Practical Reliability Engineering. John Wiley & Sons,<br>1984.  |
| OCO-90  | O'Connor, P.D.T.:                              | Zuverlässigkeitstechnik. VCH Verlagsgesellschaft,<br>Weinheim, 1990.  |
| ODR-00  | Odrich, B.:                                    | Big Brother am Bau behält Bagger und Bulldozer im<br>Blick. VDI-Nachrichten, Nr. 32, 11.08.00, S. 14.   |
| PER-00  | Perlewitz, H.:                                 | Planung und marktorientierter Betrieb von Demon-<br>tagefabriken. Dissertation TU Berlin. Berlin FhG/IPK<br>Berlin, 2000.   |
| PER-99  | Perlewitz, U.:                                 | Konzept zur lebenszyklusorientierten Verbesserung<br>der Effektivität von Produktionseinrichtungen, Dis-<br>sertation, Berlin, IPK, 1999.   |
| PFE-01  | Pfeifer, T.:                                   | Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Tech-<br>niken. Hanser Verlag, 2001.   |
| REN-96  | Renneberg, R.:                                 | Molekulare Erkennung mittels Immuno- und Re-<br>zeptorsensoren. In: Spektrum der Wissenschaft -<br>Dossier: Mikrosystemtechnik, S. 87-93, Heidelberg,<br>1996.  |
| ROS-99  | Rose, B.:                                      | Take-off mit intelligentem Akku. In: VDI nachrichten<br>Nr. 42 vom 22. Oktober 1999, S. 20.   |
| SCH-77  | Schindel, V.:                                  | Risikoanalyse. Florentz Verlag, München, 1977.  |
| SCH-79  | Schäfer, E.:                                   | Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit in der<br>Elektronik. Vogel-Verlag, Würzburg, 1979.   |
| SCH-89  | Scheller, F.;<br>Schubert, F.:                 | Biosensoren. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin,<br>1989.  |
| SCH-92a | Schiessle, E.:                                 | Sensortechnik und Messwertaufnahme. Vogel<br>Buchverlag, 1. Auflage, Würzburg, 1992.  |
| SCH-92b | Schaumburg, H.:                                | Sensoren. Teubner-Verlag, Stuttgart, 1992.  |
| SCH-94  | Scheidt, L-G.;<br>Zong, S.:                    | An Approach to Achieve Reusability of Electronic<br>Modules. In: Proceedings of the IEEE International<br>Symposium on Electronics & the Environment ISEE<br>1994, May 2-4, 1994, San Francisco, USA. |
| SCH-95  | Schoess, J.N.;<br>Paul, C.:                    | Smart fastener technology for aging aircraft. In:<br>SPIE Vol. 2444, pp. 192-197, 1995.   |

- SCH-95a Schulze, L.; Neubert, H.: Vereinfachte Demontage feinwerktechnischer Produkte durch simultan lösbare Verbindungen. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 44 (1995) Heft 4, S. 32-35.
- SCH-96 Schultes, G.: Grundlagen der Schienenfahrzeuginstandhaltung. In: Konferenzband der 1. Schienenfahrzeugtagung RAD 96, Dresden, Februar 1999, S. 256-262.
- SCH-96a Scheller, F.; Schubert, F.; Pfeiffer, D.: Enzym- und Zellsensoren – Anwendungen, Trends und Perspektiven. In: Spektrum der Wissenschaft - Dossier: Mikrosystemtechnik, S. 82-86, Heidelberg, 1996.
- SCH-99 Scholz-Reiter, B.; Scharke, H.; Hucht, A.: Flexible robot-based disassembly cell for obsolete TV-sets and monitors. Robotics and Computer Integrated Manufacturing 15 (1999) S. 247-255.
- SCH-00 Schaaf, W.: Grundlagen des Systems Engineering. Wt Werkstattstechnik, 90 (2000), Heft 4, S. S. 155-158.
- SEL-95 Seliger, G.; Schmidtmann, R.; Hentschel, C.: Wirtschaftliches Recycling von Bildröhren durch Demontage. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF), 90 (1995) 6. München: Carl Hanser Verlag, S. 296-297.
- SEL-97 Seliger, G.; Friedrich, U.; Müller, K.; Perlewitz, H.: Produktmodularität steigert die Nutzenproduktivität von Ressourcen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF), 11, 1997, München, Carl Hanser Verlag, S. 592-595.
- SEL-00 Seliger, G.: Ökologie als wirtschaftliche Chance. SFB 281 Demontagefabriken. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF), 7, 2000, München: Carl Hanser Verlag, Sonderbeilage, S. 1.
- SEL-00a Seliger, G.; Grudzien, W.: LCU – A concept for lifelong product supervision in closed loop economy. In: Proceedings of the Electronics Goes Green 2000+ Congress and Exhibition, 11-13. September, Berlin (2000), Volume 1, pp. 397-402.
- SEL-00b Seliger, G.; Uhlmann, E.; Keil, T.; Härtwig, J.-H.: Realisierung eines Pilot-Demontagesystems. SFB 281 Demontagefabriken. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF), 7, 2000, München: Carl Hanser Verlag, Sonderbeilage, S. 20-24.
- SEL-01 Seliger, G.; Rebafka, U.; Stenzel, A.: Flexible Disassembly Tools. Proc. Of the 2001 IEEE International Symposium on Electronics & the Environment, Denver, Colorado, S. 30-35, 2001.

Keil, T.:

- |        |                                     |   |
|--------|-------------------------------------|---|
| SIK-00 | Sikora, A.:                         | Der Speicher-Chip-Report, Elektronik 26/2000, S. 42-52.   |
| SIM-98 | Simon, M.;<br>Pu, J.;<br>Moore, P.: | The Whitebox – capturing and using product life cycle data. In: Proceedings of the 5th International Seminar on Life Cycle Engineering, Life Cycle Design '98, KTH Stockholm, Sweden, September 16-18 1998, pp. 161-169.                          |
| SKA-01 | Skapski, R.:                        | Siodmy, wspanialy. In: auto, motor i sport. Nr. 9 September 2001, Wroclaw (Breslau), Polen, 2001, S. 10-13.   |
| SMI-98 | Smith, D.;<br>Searle, I.:           | Damage Dosimeter: A Portable Battery Powered Data Acquisition Computer. In: Western Regional & Strain Gage Comittee. Februar 1998.  |
| SPA-01 | Spath, D.;<br>Demuß, L.:            | Betreibermodelle für den Maschinen- und Anlagenbau. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF), Jahrg. 96 (2001) 1-2, München: Carl Hanser Verlag.  |
| STE-98 | Steinhilper, R.:                    | Remanufacturing-The Ultimate Form of Recycling. Stuttgart. Fraunhofer IRB Verlag, 1998.   |
| TAA-00 | Taag, H.-J.:                        | Reliabilty-centred Maintenance (RCM). Zuverlässigkeit-orientierte Instandhaltung. In: Konferenzband Maintenance Ideas, VDI Berichte 1554, Aachen, Mai 2000, S. 609-624.   |
| TAY-96 | Taylor, R.-F.:                      | Handbook of chemical and biological sensors. Bristol, 1996.   |
| THE-95 | Theissen, A.:                       | Erneuern statt Verschrotten - Remanufacturing von Kopiergeräten. In: Industrielle Konzepte der Nutzungsintensivierung und Lebensdauerverlängerung von Produkten. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, 1995. |
| TÖN-97 | Tönshoff, H.K.;<br>Soehner, C.:     | Sfb 384 Arbeits- und Ergebnisbericht 1994-1997. S. 29-66.   |
| TRE-96 | Trebst, W.;<br>Kriegel, T.:         | Zustandsbezogene Instandhaltung von Triebfahrzeugen. In: Konferenzband der 1. Schienenfahrzeugtagung RAD 96, Dresden, Februar 1996, S. 256-262.   |
| TRE-99 | Trebst, W.;                         | Präventive und korrektive Instandhaltung – Trends,  |

- Kriegel, T.: Bewertung und Optimierung. In: Konferenzband der 3. Schienenfahrzeugtagung RAD 99, Dresden, 24. - 26. Februar 1999, S. 56-62.
- VDA-84 N.N. Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie. Band 3: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten. Frankfurt/Main: VDA Verband der Automobilindustrie e.V., 2. Auflage, 1984.
- VDI 2243 N.N. VDI-Richtlinie 2243: Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte. Blatt 1: Grundlagen und Gestaltungsregeln. Berlin: Beuth-Verlag, 1993.
- VDI 3780 N.N. VDI-Richtlinie 3780: Technikbewertung. Begriffe und Grundlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991.
- VDI 3822-2 N.N. VDI-Richtlinie 3822 Blatt 2 Schadensanalyse; Schäden durch mechanische Beanspruchungen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1984.
- VDI 3822-3 N.N. VDI-Richtlinie 3822 Blatt 3: Schadensanalyse; Schäden durch Korrosion in wässrigen Medien. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990.
- VDI 3822-4 N.N. VDI-Richtlinie 3822 Blatt 4 Schadensanalyse; Schäden durch thermische Beanspruchungen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999.
- VDI 3822-5 N.N. VDI-Richtlinie 3822 Blatt 5: Schadensanalyse; Schäden durch tribologische Beanspruchungen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999.
- WAC-96 Wacker, R.: LARSYG – Ein neues System für die Revision von Güterwagen. In: Konferenzband der 1. Schienenfahrzeugtagung RAD 96, Dresden, Februar 1999, S. 241-244.
- WIE-96 Wienholz, T.: Methodik der Verschleißauswertung an Güterwagenbauteilen. In: Konferenzband der 1. Schienenfahrzeugtagung RAD 96, Dresden, Februar 1996, S. 245-251.
- WUT-87 Wuttke, W.: Tribophysik - Reibung und Verschleiß von Metallen. Fachbuchverlag, Leipzig, 1986.
- ZUS-94 Zussman, E.; Kriwet, A.; Seliger, G.: Disassembly oriented assessment methodology to support design for recycling, CIRP Annals, 43/1, pp. 9-14, 1994.

## 8 Anhang

Für die in Kapitel 2.1.1.10 identifizierten vierzehn für die LCU geeigneten physikalischen Messgrößen werden Messprinzipien aufgelistet. In der rechten Spalte „Beschreibung“ werden Ausführungsformen und die durch die Messgröße veränderten Parameter der Sensoren beschrieben.

### Beschleunigung:

Messprinzip	Beschreibung
kapazitiv	Elektrodenabstand
magnetisch	Hall-Effekt; Gauß-Effekt; Induktion (Magnetostriktion); magnetischer Kreis zweier Spulen (Tauchanker); Luftspaltveränderung (Drosselprinzip); Kopplung zweier Spulen (LVDT)
piezoelektrisch	piezoresistiv
resistiv	DMS

### Dehnung

Messprinzip	Beschreibung
piezoelektrisch	Oberflächenwellen-Resonator
resistiv	DMS

### Dicke

Messprinzip	Beschreibung
magnetisch	induktiv: Wirbelstromverfahren (nichtleitende Beschichtungen auf nicht magnetisierbaren Metallen); magnet-induktiv (nicht magnetisierbare Schicht auf magnetisierbarem Träger)
per Strahlung	radiometrisch; Röntgenfluoreszenz (metallische Beschichtung auf metallischem Träger); optisch (Banddickenmessung mit Laser-Triangulation)
piezoelektrisch	Ultraschall (Impuls-Laufzeitverfahren)

### Drehmoment

Messprinzip	Beschreibung
kapazitiv	Torsion über kapazitiven Wegsensor
magnetisch	Hall; induktiv (Torsion über z.B. Differentialtauchankersensor); magneto-elastisch
mechanisch	Schwingsaite (Eigenfrequenzmessung)
piezoelektrisch	Oberflächenwellen-Resonator
resistiv	DMS

**Druck**

<b>Messprinzip</b>	<b>Beschreibung</b>
kapazitiv	Elektrodenabstand; Elektrodenfläche
magnetisch	Induktiv: Magnetischer Kreis zweier Spulen (Tauchanker), Kopplung zweier Spulen (LVDT), Differentialdrossel, Differentialtrafo; Hall; Gauß; magneto-elastisch; Induktion: Elektrodynamische Kraftkompensation
mechanisch	Manometer; Resonanzfrequenzmessung bei einer Schwingensaite
per Strahlung	Vakuummeter (Wechselwirkung von Gasmolekülen mit Wärmeleiteffekten); optisch: faseroptische Wegmessung
piezoelektrisch	über Kraftmessung; Quarzkristallresonator; akustische Oberflächenwellen
resistiv	DMS, piezoresistiv (dynamisch und statisch)

**Durchfluss**

<b>Messprinzip</b>	<b>Beschreibung</b>
kapazitiv	Permittivitätszahl
magnetisch	induktiv: Magnetischer Kreis zweier Spulen (Tauchanker); induktiv: nur für elektrisch leitende Flüssigkeiten; Induktion: elektrodynamisch
mechanisch	Wirkdruckverfahren; Schwebekörper; Wirbelfrequenz; Laufzeitverfahren; Coriolis-Prinzip
per Strahlung	Optisch: Geschwindigkeitsmessung nach dem Laser-Doppler-Verfahren
piezoelektrisch	Ultraschall (Laufzeitverfahren)
resistiv	NTC-Widerstand; Metall-DMS; Thermische Verfahren (Abkühl-, Aufheiz- und Konstanttemperaturverfahren)

**Feuchte**

<b>Messprinzip</b>	<b>Beschreibung</b>
chemisch	Kalorimetrisch: Tauspiegelhygrometer: Peltier-Element heizt Gas bis zum Taupunkt auf, Temperatur ist Maß für die Feuchte Kalorimetrisch: Temperaturdifferenz: Aspirationshygrometer: Messung der Verdunstungswärme mit zwei Thermometern (feucht und trocken gehalten); Physisorptionssensoren
kapazitiv	Permittivitätszahl: feuchtes Gas wirkt als Dielektrikum in Kondensatoren (nur bei elektrisch nichtleitenden Stoffen wie Papier- oder Pressspanplattenherstellung)
mechanisch	Haarhygrometer: Länge tierischer Haare feuchtigkeitsabhängig; Schwingquarz-Hygrometer: Änderung der Schwingfrequenz eines Quarzes bei Feuchtigkeitsaufnahme; Bistreifenhygrometer: einseitige hygroskopische Quellschicht führt bei Feuchte zu Verformung eines Metallfederbandes

Messprinzip	Beschreibung
per Strahlung	Mikrowellenverfahren: Änderung der Güte eines gasgefüllten Resonanzkreises mit Feuchte; Mikrowellenhygrometer: Messung der Durchstrahlung und Reflexion; Neutronen-Feuchtesensor: Neutronen werden in Abhängigkeit vom Wassergehalt abgebremst; Detektion der Impulsrate mittels Szintillationszähler oder Zählrohr; Infrarothygrometer: Wasser besitzt ausgeprägtes IR-Spektrum; optisch: Messung der Intensität einer optischen Absorption aufgrund der Anwesenheit von Wassermolekülen
piezoelektrisch	Schwingquarz-Hygrometer: Änderung der Schwingfrequenz eines Quarzes bei Feuchtigkeitsaufnahme
resistiv	Widerstand elektrisch leitfähiger Kunststoffe oder poröser Keramiken ändert sich mit Feuchte; Taupunktverfahren: bei Unterschreitung des Taupunktes kondensiert Wasserdampf und setzt komplexen Widerstand herab, Leitwerthygrometer: hygroskopische Schichten adsorbieren Wasser → Abnahme des Oberflächenwiderstandes; LiCl-Hygrometer: LiCl ändert seine Leitfähigkeit bei Wasseraufnahme; Elektrolysehygrometer: Wasser wird zu Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt → Elektrolysestrom ist Maß für Gasfeuchte

### Kraft

Messprinzip	Beschreibung
kapazitiv	Kapazitiver Wegaufnehmer am Federkörper
magnetisch	Induktiv: Magnetischer Kreis zweier Spulen (Tauchanker), Kopplung zweier Spulen (LVDT), Elektrodynamische Kraftkompensation; Permeabilitätszahl: Magnetostriktion und Magnetoelastizität; Hall-Effekt
mechanisch	Resonanzfrequenzmessung bei einer Schwingsaite
per Strahlung	optisch: faseroptische Wegmessung
piezoelektrisch	Kraftaufnehmer, Quarzresonator
resistiv	Metall-DMS, Dünnschicht-DMS, Dickschicht-DMS, HL-DMS, piezoresistiv

### Länge

Messprinzip	Beschreibung
kapazitiv	Elektrodenabstand, Elektrodenfläche (Differential-Zylinderkondensator)
magnetisch	Kopplung zweier Spulen; induktiv: Tauchanker, Queranker
mechanisch	Nonius, Mikrometerschraube, Pneumatischer Sensor (dann über Druckmessung)
per Strahlung	optisch: Schattenbildverfahren, Interferometer, Durchlichtverfahren, Auflichtverfahren, Inkremente, Triangulation, CCD; Mikrowellensensor (bei Kunststoffen), Impulslaufzeitverfahren
piezoelektrisch	Ultraschall
resistiv	Linear-/Ringpotentiometer



**Partikel**

<b>Messprinzip</b>	<b>Beschreibung</b>
chemisch	Adsorption: Oberflächenbestimmung durch Gasadsorption: Messung der zur Bedeckung nötigen Gasmenge; Oberflächenbestimmung durch Adsorption gelöster Stoffe; Kalorimetrisch: Oberflächenbestimmung mit Hilfe der Benetzungswärme;
mechanisch	Oberflächenbestimmung aufgrund des Strömungswiderstandes: Messung des Druckverlustes bei Durchströmung der Probe; Sedimentation: Suspensionsverfahren: Gleichverteilung der Partikel bei Messbeginn, Rückschluss aus Sinkgeschwindigkeit und Dichte auf Durchmesser; Überschichtungsverfahren: Säule zum Messbeginn partikelfrei, Rückschluss aus Sinkgeschwindigkeit und Dichte auf Durchmesser; Sedimentationszentrifuge: schneller als Messungen, die auf Erdschwerefeld basieren; Siebanalyse: Trennung auf Rütteltisch durch nach unten abnehmende Maschenweite der Siebe; Ultraschallspektroskopie: Messung des Dämpfungsspektrums, Rückschluss auf Partikelgrößenverteilung
per Strahlung	Optisch: Mikroskopanalyse: Foto wird ausgemessen; Extinktionsmessung: Partikel schwächen Lichtstrom durch Absorption und Streuung; Trübungsmessung: Konzentrationsmessung durch Lichtschwächung; Streulichtspektrometer: Partikel werden mit Laserlicht bestrahlt und streuen dieses. Sekundärelektronenvervielfacher als Empfänger; Tyndallometer mißt Staubkonzentration beim Einsaugen in eine Staubkammer durch Lichtstreuung; Lasermesstechnik: Laserbeugungsspektrometer: ebene Welle wird an Partikeln gebeugt (Rückschluss vom Durchmesser der Beugungsringe auf Partikelgröße); Flugzeitspektrometer: Beschleunigung in Abhängigkeit von Größe und Dichte (Flugzeitmessung mit parallelen Laserstrahlen); Laser-Doppler-Anemometrie: Doppler-Verschiebung aufgrund der Partikelgeschwindigkeit; ionisierende Strahlung: Durchstrahlung (Schwächung)
resistiv	Feldstörungsverfahren: elektrischer Widerstand steigt, wenn Partikel durch eine stromdurchflossene Kapillare gesaugt wird

**Position**

<b>Messprinzip</b>	<b>Beschreibung</b>
chemisch	elektrochemisch (potentiometrisch)
kapazitiv	Kollisionswächter (D-Feld-Sensor), Anwesenheit und Näherung
magnetisch	Hall-Effekt und Gauß-Effekt; Magnetostatik: Reed-Sensor und -Schalter; induktiv (Anwesenheit und Näherung)
mechanisch	taktile Sensorfelder (Anwesenheit)
per Strahlung	Optisch: Innerer Photoeffekt: Photodiode, Phototransistor, Lichtschranke, CCD (Anwesenheit), Spaltsensor (mehrere Fotodioden angeordnet): Positionierung eines Lichtpunktes
piezoelektrisch	Ultraschall (Abstand, Anwesenheit)
resistiv	Potentiometer

## Temperatur

Messprinzip	Beschreibung
chemisch	Temperaturmessfarben: temperaturabhängige Farbänderung von chemischen Verbindungen
mechanisch	Ausdehnungsthermometer: Flüssigkeits-Glasthermometer, Bimetallthermometer, Stabausdehnungs-Thermometer
per Strahlung	Thermisch: Thermoelektrisch, Bolometer, Pyrometer (nur Wechselstrahlung); optisch: LWL, Silizium-Sperrschicht, Thermosäule, photoelektrisch: Innerer Photoeffekt: Photodiode, Photowiderstand
piezoelektrisch	Quarzthermometer
resistiv	Metall-Widerstandsthermometer, NTC-Widerstand, PTC-Widerstand, Silizium-Widerstandstemperatursensor

## Winkel

Messprinzip	Beschreibung
kapazitiv	Elektrodenabstand, Elektrodenfläche (Ringkondensator)
magnetisch	Induktiv: Magnetischer Kreis zweier Spulen (Queranker (kleine Winkel), Tauchanker, Kurzschlussring), Resolver, Inductosyn, Kopplung zweier Spulen (LVDT); Induktion: elektrodynamisch (Transformator); Hall- und Gauß-Effekt; Magnetostriktion: Wiegandsensor
mechanisch	Messschrauben, Fühlhebelmessgeräte, Feinzeiger, digitale Messuhren
per Strahlung	optisch: Laser, Faseroptik und Faserkreisel, inkrementale und codierte Winkelaufnehmer
resistiv	Ringpotentiometer, Ringrohrwinkelaufnehmer

## Zeit

Die Zeit wird durch das LCB elektronisch gemessen. Die Zeitbasen können hierbei schaltungstechnisch unterschiedlich realisiert werden.